

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
新能源技术丛书

# 生物质能源

主 编 刘 灿

副主编 刘 静

参 编 余 昆 张 鑫

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

生物质能是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式。生物质能作为绿色、可持续的能源，它以燃料乙醇、成型固体燃料、沼气、氢能、生物柴油等形式应用在国民经济的各个领域，并逐步渗透到我们的日常生活中。

本书围绕我国生物质能产业及主要相关技术进行了阐述，全书共 12 章，内容涵盖了生物质能产业相关的政策、生物质资源分布以及前沿生产技术，较为全面地介绍了生物质能的相关知识。

本书通俗易懂，面向的读者群广泛，图书可作为能源化工、生物化工、应用化学、生物工程等方向读者、投资者的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

生物质能源 / 刘灿主编 . —北京: 电子工业出版社, 2016.8

(新能源技术丛书)

ISBN 978-7-121-28276-8

I . ①生… II . ①刘… III . ①生物能源 IV . ① TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 045328 号

策划编辑: 柴 燕 张 楠

责任编辑: 张 楠

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 11.75 字数: 293 千字

版 次: 2016 年 8 月第 1 版

印 次: 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: (010) 88254579。

## 序 言

能源是经济发展的血液。然而，随着人类社会的发展速度的不断提高，造成了石化能源的急剧消耗，使之渐趋枯竭。同时，石化能源的大量消费也带来了日益严峻的气候问题和巨大的环境压力，这使得石化能源的替代品——生物质能源引发了社会各界的广泛关注。

生物质能源是重要的可再生能源，是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式——即以生物质为载体的能量。目前，世界上技术较为成熟、实现规模化开发的生物质能的利用方式主要包括生物质发电、沼气技术、生物液体燃料和生物质成型燃料等。生物质能的开发利用将节约和替代大量石化能源，显著减少污染物和温室气体排放，促进人与自然的协调发展。我国将发展生物质能作为替代石化能源、保障能源安全的重要战略措施，积极推动生物质能的开发利用，将使生物质能在我国能源安全、节能减排中发挥更加重要的作用，有力地推进经济和社会的可持续发展。

本书围绕我国生物质能源产业、主要相关技术的发展前景进行阐述，涵盖了与生物质能源产业相关的政策、经济、资源分布以及前沿的生产技术，较为全面地介绍了生物质能源的相关知识。本书理论与实际相结合，进行了大量实例分析，便于读者的阅读和理解。全书共 12 章，第 1 章阐述了我国生物质能源的发展目标和发展现状；第 2 章阐述了我国生物质能源政策；第 3 章探讨了生物质能与低碳经济；第 4 章介绍了我国生物质资源；第 5 章介绍了生物质燃气的发展现状和生产技术；第 6 章介绍了我国生物柴油的生产情况；第 7 章介绍了生物燃料乙醇的发展动向；第 8 章介绍了固体成型燃料；第 9 章介绍了生物质氢能源；第 10 章介绍了生物航空燃料；第 11 章介绍了微藻生物能源；第 12 章介绍了生物质发电。

本书通俗易懂，面向的读者群广泛，涉及面广，可作为能源化工、生物化工、应用化学、生物工程等方面的读者、投资者的参考书，由于生物质能源技术涉及的学科多，每个学科研究发展迅速，加之编者水平和时间条件所限，遗漏许多文献和资料，存在不少缺点和错误，书中不足之处恳请读者批评、谅解。

本书的组织编写和修订工作得到了北京农学院农业部都市农业（北方）重点实验室、北京林业大学材料科学与技术学院、北京空间机电研究所的帮助，感谢电子工业出版社为本书出版给予的支持，感谢“北京市优秀人才培养资助项目”“大北农”基金给予经费支持。

编者

2016 年 5 月





# 目 录

## 第 1 章 再生能源与生物质能 / 1

- 1.1 再生能源的发展现状 / 2
  - 1.1.1 再生能源的利用现状 / 3
  - 1.1.2 生物质能的组成 / 5
- 1.2 生物质能发展现状 / 8
  - 1.2.1 生物质能的发展目标 / 8
  - 1.2.2 生物质能发展的基本原则 / 9
  - 1.2.3 生物质能的发展方式 / 10
- 1.3 生物质能的示范工程和重点工程 / 11
  - 1.3.1 生物质能的综合利用产业化示范 / 11
  - 1.3.2 生物质能的发展重点工程 / 13
- 1.4 发展生物质能的效益和前景 / 14
- 参考文献 / 15

## 第 2 章 生物质能产业与政策分析 / 17

- 2.1 国外生物能源发展现状 / 18
- 2.2 国外政策经验对我国的启示 / 23
- 2.3 我国能源政策的发展历程 / 25
- 2.4 我国生物能源政策探讨 / 28
- 参考文献 / 32

## 第 3 章 生物质能与低碳经济 / 33

- 3.1 我国碳排放概况 / 34
- 3.2 我国能源消费结构 / 35
- 3.3 生物质能与节能减排 / 37
- 3.4 低碳经济 / 38
- 3.5 生物质能与能源结构调整 / 39
- 3.6 生物质能发展面临的挑战 / 40
- 参考文献 / 42

## 第4章 生物质资源 / 43

- 4.1 生物质资源的组成 / 44
- 4.2 生物质资源的分布 / 45
  - 4.2.1 农业生物质资源 / 45
  - 4.2.2 林木生物质资源 / 47
  - 4.2.3 畜禽粪便 / 52
  - 4.2.4 生活污水和工业有机废水 / 52
  - 4.2.5 固体废物 / 52
- 4.3 生物质资源开发前景 / 52

## 第5章 生物质燃气 / 55

- 5.1 生物质燃气的发展与现状 / 56
- 5.2 生物质燃气的生产方法 / 57
  - 5.2.1 热化学法制备生物燃气 / 57
  - 5.2.2 生物法生产生物质燃气 / 61
- 5.3 生物质燃气的应用前景 / 67
- 参考文献 / 68

## 第6章 生物柴油 / 69

- 6.1 国内外生物柴油发展状况 / 70
  - 6.1.1 全球生物柴油产业状况 / 70
  - 6.1.2 我国生物柴油发展概况 / 70
  - 6.1.3 生物柴油标准 / 71
- 6.2 生物柴油的生产和性能 / 72
  - 6.2.1 生物柴油的生产 / 73
  - 6.2.2 生物柴油的性能 / 77
- 6.3 第二代生物柴油——绿色柴油的生产与性能 / 77
  - 6.3.1 绿色柴油的生产 / 78
  - 6.3.2 绿色柴油的性能 / 80
- 6.4 我国生物柴油产业的挑战和展望 / 81
- 参考文献 / 82

## 第7章 生物燃料乙醇 / 83

- 7.1 国内外燃料乙醇的发展状况 / 85
  - 7.1.1 国外燃料乙醇的概况 / 85
  - 7.1.2 我国燃料乙醇的发展状况 / 86

- 7.2 燃料乙醇的生产 / 87
  - 7.2.1 乙醇生产的原料 / 87
  - 7.2.2 燃料乙醇的生产 / 88
- 7.3 燃料乙醇的发展前景和挑战 / 96
- 参考文献 / 97

## 第 8 章 生物质固体成型 / 99

- 8.1 成型燃料的特点和行业标准 / 100
  - 8.1.1 成型燃料的特点 / 100
  - 8.1.2 现行的行业标准 / 101
  - 8.1.3 成型燃料的应用 / 101
- 8.2 成型燃料的研究现状 / 102
- 8.3 生物质固体成型原理 / 103
  - 8.3.1 生物质各组分的作用 / 103
  - 8.3.2 生物质固体成型过程 / 104
- 8.4 固体成型方法 / 107
  - 8.4.1 工艺分类及特点 / 107
  - 8.4.2 生物质固体成型工艺流程 / 109
- 8.5 生物质成型设备 / 110
  - 8.5.1 主要成型设备 / 110
  - 8.5.2 配套设备 / 113
- 8.6 生物质成型燃料的发展前景与挑战 / 115
- 参考文献 / 116

## 第 9 章 生物质氢能源 / 117

- 9.1 氢能的特点和发展现状 / 118
  - 9.1.1 氢能的特点 / 118
  - 9.1.2 国内外氢能源的发展状况 / 119
- 9.2 氢能的生产 / 120
  - 9.2.1 石化燃料制氢 / 120
  - 9.2.2 电解水制氢 / 121
  - 9.2.3 生物质制氢 / 121
- 9.3 氢能的储备和利用 / 126
- 9.4 生物制氢存在的问题及展望 / 129
- 参考文献 / 130

## 第 10 章 生物航空燃料 / 131

- 10.1 生物航空燃料的发展背景 / 132
  - 10.1.1 生物航空燃料的试飞和商业运营 / 132
  - 10.1.2 生物航空燃料的投产情况 / 133
  - 10.1.3 生物航空燃料与减排 / 136
  - 10.1.4 生物航空燃料标准 / 138
- 10.2 生物航空煤油的生产 / 139
  - 10.2.1 生物航空煤油的生产原料 / 139
  - 10.2.2 生物航空煤油的制备工艺 / 139
- 10.3 生物航空燃料面临的挑战 / 142
- 参考文献 / 143

## 第 11 章 能源微藻 / 145

- 11.1 能源微藻的发展状况 / 146
- 11.2 微藻生物燃料的生产 / 148
  - 11.2.1 利用藻类直接合成生物燃料 / 148
  - 11.2.2 微藻油脂的合成 / 151
  - 11.2.3 微藻其他相关产品的开发 / 157
- 11.3 微藻生物能源的挑战和展望 / 158
- 参考文献 / 160

## 第 12 章 生物质发电 / 161

- 12.1 生物质发电的发展现状 / 162
- 12.2 生物质发电技术 / 163
  - 12.2.1 生物质直燃发电 / 163
  - 12.2.2 生物质混合燃烧发电 / 165
  - 12.2.3 生物质气化发电 / 166
- 12.3 生物质发电面临的挑战和机遇 / 174
- 参考文献 / 175

## 附录——生物质能相关政策 / 177

# 再生能源与生物质能



随着经济发展,我国能源需求日益增长,已成为世界能源生产和消费大国。目前,增加能源供应、保障能源安全是我国经济社会发展所面临的重大挑战。

可持续发展的观念在 20 世纪 70 年代后逐步成为国际社会共识,生物质能作为重要的再生资源,其开发和利用受到各国重视,许多国家将开发利用生物质能作为能源战略的重要组成部分。美国提出到 2020 年再生生物燃料占交通燃料的 20%,欧盟提出到 2020 年生物燃料占交通燃料的 10%。

再生能源包括水能、风能、太阳能、生物质能、地热能及海洋能等,再生能源的开发利用有利于人与自然的和谐发展。

生物质能作为重要再生能源之一,在满足我国能源需求、减少环境污染、改善能源结构方面具有巨大潜力。现阶段,我国生物质能消费占能源消费总量的比重较低,产业基础较为薄弱,有待我们大力发展。我国《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》明确提出:“鼓励生产与消费可再生能源,提高其在一次能源消费中的比重。”加快我国生物质能发展,是促进节能减排,更好地应对经济、社会可持续发展的重要突破口。

所谓生物质,广义上讲一切有生命的可以生长的有机物质统称为生物质,包括植物、动物和微生物。从狭义上讲,生物质主要是指农林业生产过程中除粮食、果实以外的秸秆、树木等木质纤维素、农产品加工业的下脚料、农林废弃物及畜牧业生产过程中的禽畜粪便和废弃物等物质。

生物质能(biomass energy),就是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式,即以生物质为载体的能量,它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用,可转化为常规的固态、液态和气态燃料,是唯一一种可再生的碳源<sup>[1]</sup>。生物质能作为重要的再生能源,具有资源来源广泛、利用方式多样化、能源产品多元化、综合效益显著的特点。

生物质能作为四大能源之一,其消耗量仅次于石油、煤炭及天然气,在一次能源中所占的比例达 14%。随着石化能源的日趋枯竭,再加上日益严峻的气候和环境问题,生物质能的开发和利用越来越受到社会各界的广泛关注,世界各国都在加大力度开发生物质能,到 21 世纪中叶,采用新技术生产的各种生物质替代燃料将占全球总能耗的 40% 以上。

## 1.1 再生能源的发展现状

一次能源可以进一步分为再生能源和不可再生能源两大类。再生能源在自然界中经过亿万年形成,短期内无法恢复且随着大规模的开发利用,其储量越来越少终将枯竭的能源称之为非再生能源,包括煤、原油、天然气、油页岩、核能等,它们是不能再生的。再生能源包括太阳能、水能、风能、生物质能、波浪能、潮汐能、海洋温差能等<sup>[2]</sup>。受全球气候变化和石油价格上涨的影响,可再生能源的开发利用受到国际社会的广泛关注,各国纷纷提出了明确的发展目标,制定了扶持可再生能源发展政策法规,使可再生能源应用技术水平不断升级、提高,相关产业规模逐步扩大,使可再生能源成为推进能源多样化和实现

可持续发展的重要能源。

1997年,欧盟提出,能源消费结构中,1996—2010年可再生能源在一次能源消费中的比例要从6%提高到12%,在总发电量中,可再生能源发电量占比从14%提高到22%。2007年年初,欧盟又拟定新的发展目标,要求到2020年,可再生能源消费占全部能源消费的20%,在全部发电量中可再生能源发电量占到30%。美国、巴西、日本、澳大利亚、印度等国也制定了明确的发展目标,促进可再生能源的发展。

我国资源潜力大、发展前景好的可再生能源主要包括水能、生物质能、风能、太阳能、地热能及海洋能。经过多年发展,我国在可再生能源方面取得了较大的进步,风电、光伏发电、太阳能热利用和生物质能的高效利用也取得了明显进展,这些都为调整能源结构、保护环境、促进经济和社会发展做出了重大贡献<sup>[3]</sup>。

### 1.1.1 再生能源的利用现状

#### 1. 水能

水力发电,是指将水能转换为电能的工程建设和生产运行等。水能是取之不尽用之不竭的清洁能源,它仅利用大自然所赋予的能量,不消耗水,也不产生污染。水力发电是目前最成熟的可再生能源发电技术,在世界各地得到广泛应用。当前,经济发达国家的水能资源已基本开发完毕,水电建设主要集中在发展中国家。根据2011年我国水能资源普查结果,我国水能资源技术可开发量为5.4亿千瓦,年发电量为2.5万亿千瓦时;经济可开发量为4亿千瓦,年发电量为1.75万亿千瓦时。目前,我国水电开发容量已达到技术可开发量的52%左右,发电量占到技术可开发量的40%左右。截至2015年年底,我国水电装机达3.20亿千瓦,占全国全部电力装机容量的22.2%,稳居世界第一。全国水电全年新增装机2185万千瓦,水电年发电量超越万亿大关,达到10 661亿千瓦时,同比增长18.0%。

#### 2. 风能

风电又称风能发电或者风力发电。根据最新风能资源评价,我国陆地可利用风能资源约3亿千瓦,近岸海域可利用风能资源7亿千瓦,总计约10亿千瓦。风能资源主要分布在东北、华北北部和西北地区,以及东部沿海陆地、岛屿及近岸海域。近年来,并网风电机组的单机容量不断增大,随着风电的技术进步和应用规模的扩大,风电成本持续下降,其经济性与常规能源已十分接近。全球风能理事会发布报告指出,2014年,全球风电新增装机容量5147.7万千瓦,同比上升44%。依据中国风能协会和国家能源局发布的统计数据,2015年中国风电新增装机容量达3050万千瓦,累计装机容量达到1.45亿千瓦,同比上升26.6%,其中并网容量近1亿千瓦,占全部发电装机容量的7%。2014年世界其他国家风电发展情况如下:欧洲风电装机在2014年实现了小幅增长,新增装机容量达到1282万千瓦,比2012年的历史最高装机纪录稍逊;德国以528万千瓦新增装机容量超越了其之前的装机纪录;英国、瑞典、法国的装机容量分别达到174万、105万、104万千瓦;



同时，非洲风电技术也开始迅猛发展，非洲总装机容量达到 93 万千瓦，非洲最大的风电场摩洛哥风电场（30 万千瓦）并网并投入运营，南非风电起步稳健，实现了 56 万千瓦的新增装机容量；拉丁美洲总装机容量达到 374 万千瓦，其中巴西以 247 万千瓦的新增装机容量继续引领拉丁美洲的风电发展。

### 3. 太阳能

太阳能是指太阳的热辐射能，太阳能的利用有光电转换和光热转换两种方式，太阳能的利用形式主要包括光伏发电、太阳能热发电。我国三分之二的国土面积年日照小时数在 2200 小时以上，年太阳辐射总量大于每平方米 5000 兆焦，属于太阳能利用条件较好的地区。西藏、青海、新疆、甘肃、内蒙古、山西、陕西、河北、山东、辽宁、吉林、云南、广东、福建、海南等地区的太阳辐射能量较大，尤其是青藏高原地区太阳能资源最为丰富<sup>[4]</sup>。

近年来并网光伏发电飞速发展，其市场容量已超过分散光伏电源。此外，太阳能的热利用技术成熟，运行成本低，正在大规模铺开应用。国家能源局等机构在 2014 年发布的全社会用电量数据显示，全年光伏发电累计并网装机容量为 2805 万千瓦，同比增长 60%，其中，光伏电站 2338 万千瓦，分布式的装机容量为 467 万千瓦。光伏年发电量约 250 亿千瓦时，同比增长超过 200%。2014 年，全国新增并网光伏发电容量 1060 万千瓦，约占全球新增容量的五分之一，占我国光伏电池组件产量的三分之一，新增光伏电站的装机容量为 855 万千瓦，分布式的装机容量为 205 万千瓦。从光伏发电的布局来看，东部地区新增装机容量为 560 万千瓦，占新增装机容量的 53%。

### 4. 地热能

地热能是指由地壳抽取的天然热能，这种能量来自地球内部的熔岩，并以热力形式存在。地热资源在全球的分布主要集中在 3 个地带：第一个是环太平洋带，包括美国西海岸、新西兰、印尼、菲律宾、日本以及中国台湾；第二个是大西洋中脊带，大部分在海洋，北端穿过冰岛；第三个是从地中海到喜马拉雅山，包括意大利和我国西藏地区。地热能的利用主要包括发电和热利用两种方式，目前这两种技术均比较成熟。据初步勘探，我国地热资源以中低温为主，适用于工业加热、建筑采暖、保健疗养和种植养殖等，资源遍布全国各地。适用于发电的高温地热资源较少，主要分布在藏南、川西、滇西地区，可装机容量潜力约为 600 万千瓦。目前我国地热发电总装机容量约为 2.78 万千瓦，据初步估算，全国可采地热资源量约为 33 亿吨标准煤。国土资源部发布官方数据表明，我国浅层地温能的资源量相当于 95 亿吨标准煤，年可利用量约 3.5 亿吨标准煤；常规地热能的资源量相当于 8530 亿吨标准煤，年可利用量约 6.4 亿吨标准煤；增强型地热能的理论资源量相当于 860 万亿吨标准煤，约为 2013 年全国能源消费总量的 20 多万倍<sup>[4-6]</sup>。其中，西藏地热蕴藏量居我国首位，其地热资源发电潜力超过 100 万千瓦时。羊八井地热电厂自从 1977 年 9 月第 1 台 0.1 万千瓦试验机组试运行成功后，装机容量最高曾达 2.5 万千瓦，目前约 2.1 万千瓦，占拉萨电网总装机容量的 41.5%。在冬季枯水季节，地热



发电量占拉萨电网的 60%，成为其主力电网之一，为缓解拉萨市电力紧缺，促进经济发展做出了重大贡献。

据美国地热能协会（GEA）公布的数字，全球地热能发电在过去的 10 年增长了 50%，2012 年全球地热发电装机容量已达到 1170 万千瓦。

## 5. 海洋能

潮汐发电是海洋能利用的主要方式，是指通过出水库，在涨潮时将海水储存在水库内，以势能的形式保存，在落潮时放出海水，利用高、低潮位之间的落差，推动水轮机旋转，带动发电机发电。潮汐发电、波浪发电和洋流发电等海洋能的开发利用也取得了较大进展，初步形成规模的主要是潮汐发电。1967 年朗斯潮汐电站在法国投入商业运行，该电站是当时世界上第一座大型潮汐电站；2011 年韩国始华湖潮汐电站建成发电，装机容量 25.4 万千瓦，成为世界最大的潮汐发电站。我国拥有丰富的海洋能资源，其中潮流能资源非常密集，我国近海潮流能属于世界上功率密度最大的地区之一。我国潮汐能的资源蕴藏量约为 1.1 亿千瓦，可开发总装机容量为 2179 万千瓦，年发电量可达 624 亿千瓦时，主要集中在福建、浙江、江苏等沿海地区。我国潮汐能资源丰富，开发和生产新一代高效可靠的潮流发电机，对于我国实施可再生能源发展战略将起到巨大的推动作用。

### 1.1.2 生物质能的组成

生物质能作为重要的可再生能源，其资源丰富，利用方式多样，能源产品多元，社会效益显著。

我国生物质能资源主要有农作物秸秆、树木枝桠、能源作物（植物）、工业有机废水、城市生活污水和废弃物等。能源局公布的数据显示，我国农作物秸秆年产生量约 6 亿吨，除部分作为畜牧饲料和造纸原料外，大约 3 亿吨可作为燃料使用，折合约 1.5 亿吨标准煤。林木枝叶和林业废弃物年可获得量约 9 亿吨，大约 3 亿吨可作为能源利用，折合约 2 亿吨标准煤。甜高粱、小桐子、黄连木、油桐等能源作物（植物）可种植面积达 2000 多万公顷，可满足年产量约 5000 万吨生物液体燃料的原料需求。畜禽养殖和工业有机废水理论上可年产沼气约 800 亿立方米；全国城市生活垃圾年产生量约 1.2 亿吨。目前，我国生物质资源可转换为能源的潜力约 5 亿吨标准煤，今后随着造林面积的扩大和经济社会的发展，生物质资源转换为能源的潜力可达 10 亿吨标准煤<sup>[4]</sup>。

“十一五”期间，我国生物质能产业开始快速发展，开发利用的规模不断扩大，部分领域已初步产业化，在替代石化能源、促进环境保护、带动农民增收等方面发挥了积极作用。“十二五”时期是转变能源发展方式、加快能源结构调整的重要阶段，是完成 2020 年非石化能源发展目标、促进节能减排的关键时期，也是生物质能产业所面临的重要发展机遇。《生物质能发展“十二五”规划》分析了国内外生物质能的发展现状，阐述了“十二五”时期我国生物质能发展的指导思想、基本原则、发展目标、规划布局和建设重点，提出了相关保障措施和实施机制，是“十二五”时期我国生物质能产业发展的基

本依据。

现代生物质能的发展要素是高效、清洁地将生物质转化为优质能源，包括电力、燃气、液体燃料和固体成型燃料等。

### 1. 生物质能发电

生物质能发电主要是以农业、林业和工业废弃物或城市垃圾为原料，采取直接燃烧或气化等方式发电，将生物质能转化为电能。

2011 年 11 月，广东省粤电集团宣布，由该集团投资的世界上装机容量最大的生物质电厂正式投入商业运营。广东粤电湛江生物质发电项目为 2 台 5 万千瓦机组，其中 1 号机组已于 2011 年 8 月底投运；2 号机组现已顺利通过 72+24 小时满负荷试运行，试运期间，机组平均负荷率达 100.6%，各项技术参数指标优良。2007—2013 年，全球生物质能发电装机容量持续上升，2012 年达到 7090 万千瓦；2013 年，全球生物质及垃圾发电新增装机规模增长有所放缓，全年新增装机容量 550 万千瓦，累计装机容量规模达到 7640 万千瓦。2006—2013 年，我国生物质及垃圾发电装机容量逐年增加，由 2006 年的 4.80 万千瓦增加至 2012 年的 980 万千瓦，年均复合增长率达 9.33%。2015 年，我国生物质发电装机容量达到 1300 万千瓦，我国生物质发电行业进入发展快车道。

我国生物质发电的主要包括蔗渣、垃圾、稻壳等农林废弃物的气化发电和沼气发电等。在引进国外垃圾焚烧发电技术和设备的基础上，经过消化吸收，现已基本具备制造垃圾焚烧发电设备的能力，建设了一些垃圾填埋气发电示范项目。虽然我国生物质发电较快，但总体来看，我国在生物质发电的原料收集、净化处理、燃烧设备制造等方面与国际先进水平还有一定差距<sup>[4]</sup>。

### 2. 生物质固体成型燃料

所谓生物质固体成型燃料，是指在外力作用下，以生物质中的木质素充当黏合剂，将分散的秸秆、木屑或树枝等农林生物质压缩成棒状、块状或颗粒状等具有一定形状和密度的成型燃料。秸秆、木屑、锯末等生物质结构松散、能量密度低，热效率仅为 10% 左右，且不易保存、不便运输。生物质经固化成型后，体积压缩比为 7 ~ 10 倍，燃烧效率平均提高 20% ~ 30%，便于储存、运输和处理。2011 年，我国的生物质固体成型燃料生产厂达到 680 余家。

《可再生能源中长期发展规划》指出，到 2020 年，生物质固体成型燃料将成为普遍使用的一种优质燃料。生物质固体成型燃料的生产包括两种方式：一种是分散方式，在广大农村地区采用分散的小型化加工方式，就近利用农作物秸秆，主要用于解决农民自身用能需要，剩余量作为商品燃料出售；另一种是集中方式，在有条件的地区，建设大型生物质固体成型燃料加工厂，实行规模化生产，为大工业用户或城乡居民提供生物质商品燃料。全国生物质固体成型燃料年利用量达到 5000 万吨<sup>[4,7]</sup>。

### 3. 生物质燃气

生物质燃气就是利用农作物秸秆、林木废弃物、食用菌渣、禽畜粪便及一切可燃性物

质作为原料转化为可燃性气态能源。生物质燃气主要包括沼气和生物质气化气。

- 沼气是指利用厌氧消化将有机垃圾、废弃农作物及人畜粪便等生物质转化为燃料气体，其主要成分为甲烷，沼气经提纯压缩后可进入天然气管道，也可作为车用燃料。
- 生物质气化气是指利用热化学途径将生物质转化为燃料气体，即在高温条件下使生物质发生不完全燃烧和热解，产生可燃气，成分含有一氧化碳、氢气、甲烷以及富氢化合物。

到2005年年底，全国户用沼气池已达1800万户，年产沼气约70亿立方米；建成大型畜禽养殖场沼气工程和工业有机废水沼气工程约1500处，年产沼气约10亿立方米。沼气技术已从单纯的能源利用发展成废弃物处理和生物质多层次的综合利用，并广泛地同养殖业、种植业相结合，成为发展绿色生态农业和巩固生态建设成果的一个重要途径。沼气工程的零部件已实现了标准化生产，沼气技术服务体系已比较完善<sup>[4]</sup>。

在农村地区主要推广户用沼气，特别是与农业生产相结合的沼气技术。在中小城镇发展以大型畜禽养殖场沼气工程和工业废水沼气工程为气源的集中供气。到2020年，约8000万户（约3亿人）农村居民生活燃气主要使用沼气，年沼气利用量约300亿立方米。我们应充分利用沼气和农林废弃物气化技术，提高农村地区生活用能的燃气比例，并把生物质气化技术作为解决农村废弃物和工业有机废弃物环境治理的重要措施。

#### 4. 生物液体燃料

生物液体燃料是指利用生物质资源生产的甲醇、乙醇、生物柴油、生物航空煤油等液体燃料，主要用于替代石化燃油作为运输燃料。随着国际石油市场供应紧张和价格上涨，发展生物燃料乙醇和生物柴油等生物液体燃料已成为替代石油燃料的重要方向。

目前，我国生产使用的生物液体燃料主要包括燃料乙醇和生物柴油。2013年我国燃料乙醇总产量突破200万吨，成为世界上继美国、巴西之后第三大生物燃料乙醇生产国；2013年以餐饮业废油、榨油厂油渣、油料作物为原料的生物柴油生产能力达到100万~120万吨。

根据我国土地资源和农业生产的特点，合理选育和科学种植能源植物，建设规模化原料供应基地和大型生物液体燃料加工企业。不再增加以粮食为原料的燃料乙醇生产能力，合理利用非粮生物质原料生产燃料乙醇。重点发展以木薯、甘薯、甜高粱等为原料的燃料乙醇技术，以及以小桐子、黄连木、油桐、棉籽等油料作物为原料的生物柴油生产技术，逐步建立餐饮等行业的废油回收体系。从长远考虑，要积极发展以纤维素生物质为原料的生物液体燃料技术。目前，已重点在东北、山东等地，建设了若干个以甜高粱为原料的燃料乙醇试点项目；在广西、重庆、四川等地，建设了若干个以薯类作物为原料的燃料乙醇试点项目；在四川、贵州、云南、河北等地，建设了若干个以小桐子、黄连木、油桐等油料植物为原料的生物柴油试点项目。到2020年，生物燃料乙醇年利用量达到1000万吨，生物柴油年利用量达到200万吨，总计年替代约1000万吨成品油<sup>[4,8]</sup>。

## 1.2 生物质能发展现状

《可再生能源中长期发展规划》、《生物质能发展“十二五”规划》中提出了从当前到2020年期间我国生物质能发展的指导思想、发展任务、发展目标以及保障措施，以便指导我国生物质能的发展。

### 1.2.1 生物质能的发展目标

“十二五”时期，生物质能的发展目标如表 1-1 所示：到 2015 年，生物质能产业形成较大规模，在电力、供热、农村生活用能领域初步实现商业化和规模化利用，在交通领域扩大替代石油燃料的规模。生物质能利用技术和生产重大装备技术的能力显著提高，出现一批技术创新能力强、规模较大的新型生物质能企业，形成较为完整的生物质能产业体系<sup>[9]</sup>。

表 1-1 “十二五”时期生物质能发展的主要指标

领 域		利用规模		年产能量		折标煤 (万吨/年)
		数 量	单 位	数 量	单 位	
生物质发电	汇总	1 300	万千瓦	780	亿千瓦时	2430
	农林生物质发电	800	万千瓦	480	亿千瓦时	1500
	沼气发电	200	万千瓦	120	亿千瓦时	370
	垃圾发电	300	万千瓦	180	亿千瓦时	560
生物质供气	汇总			220	亿立方米	1750
	沼气用户	5000	万户	190	亿立方米	1500
	大型农业剩余物燃气	6000	处	25	亿立方米	200
	工业有机废水和污水处理厂污泥等沼气	1000	处	5	亿立方米	50
生物质成型燃料		1000	万吨			500
生物液体燃料	汇总	500	万吨			500
	生物燃料乙醇	400	万吨			350
	生物柴油和航空燃料	100	万吨			150
总计						5180

2015 年，我国建成了一批生物质能综合利用新技术产业化示范项目，生物质能年利用量超过 5000 万吨标准煤。其中，生物质发电装机容量 1300 万千瓦，年发电量约 780 亿千瓦时，生物质年供气 220 亿立方米，生物质成型燃料 1000 万吨，生物液体燃料 500 万吨。

在“十二五”期间我国加快了生物质能规模化的开发利用。2015 年，农林生物质发电装机容量达到 800 万千瓦，城市生活垃圾发电装机容量达到 300 万千瓦，沼气发电装机容量达到 200 万千瓦，加快发展非粮生物液体燃料，建成油料能源林基地 200 万公顷；建



设了一批产业化规模的纤维素乙醇示范工程，建成纤维素酶批量生产基地；生物燃料乙醇年产量达到 400 万吨，生物柴油和航空生物燃料年产量 100 万吨；积极推广生物质燃气，生物质燃气集中供气达到 30 亿立方米/年，农村沼气用户 5000 万户，年产沼气 190 亿立方米；生物质成型燃料年利用量达到 1000 万吨。

在《可再生能源中长期发展规划》中明确指出，今后 15 年我国可再生能源发展的总目标是：提高可再生能源在能源消费中的比重，解决偏远地区人口用电问题和农村生活燃料短缺问题，推行有机废弃物的能源化利用，推进可再生能源技术的产业化发展。

我国探明的石油、天然气资源贫乏，单纯依靠石化能源难以实现经济、社会 and 环境的协调发展。生物质能技术已经成熟或接近成熟，具有大规模开发利用的良好前景。加快发展生物质能的规模化应用，降低煤炭在能源消费中的比重，是我国生物质能发展的首要目标。

## 1.2.2 生物质能发展的基本原则

### 1. 坚持资源的开发利用与经济、社会和环境相协调

生物质能的发展既要重视规模化的开发利用，不断提高生物质能在能源供应中的比重，也要重视生物质能对解决农村能源问题、发展循环经济，以及建设资源节约型、环境友好型社会的作用，更要重视与环境 and 生态保护的协调。要根据资源条件 and 经济社会发展的需要，在保护环境和生态系统的前提下，科学规划，因地制宜，合理布局，有序开发。特别是要高度重视生物质能开发与粮食 and 生态环境的关系，不能违法占用耕地，不能大量消耗粮食，不能破坏生态环境。

### 2. 坚持市场开发与产业发展互相促进

对资源潜力大、商业化发展前景好的风电和生物质发电等新兴生物质能，在加大技术开发投入力度的同时，采取必要措施扩大市场需求，以持续稳定的市场需求为生物质能产业的发展创造有利条件。建立以自我创新为主的生物质能技术开发 and 产业发展体系，加快生物质能的技术进步，提高设备制造能力，并通过持续的规模化发展提高生物质能的市场竞争力，为生物质能的大规模发展奠定基础。

### 3. 坚持近期开发利用与长期技术储备相结合

积极发展未来具有巨大潜力、近期又有一定市场需求的生物质能技术。既要重视近期适宜应用的水电、生物质发电、沼气、生物质固体成型燃料、风电 and 太阳能热利用，也要重视未来发展前景良好的太阳能光伏发电、生物液体燃料等生物质能技术。

### 4. 坚持政策激励与市场机制相结合

国家通过经济激励政策支持采用生物质能技术解决农村能源短缺 and 无电问题，发展循

环经济。同时，国家建立促进生物质能发展的市场机制，运用市场化手段调动投资者的积极性，提高生物质能的技术水平，推进生物质能的产业化发展，不断提高生物质能的竞争力，使生物质能在国家政策的支持下得到更大规模的发展<sup>[4]</sup>。

### 1.2.3 生物质能的发展方式

根据各地生物质资源条件和用能特点，加快推广应用技术已基本成熟、具备产业化发展条件或产业化有一定基础的生物质燃气、发电、成型燃料和液体燃料等多元化利用技术，推进生物质能规模化、产业化发展，提高生物质能梯级综合利用的水平。

#### 1. 有序发展生物质发电

(1) 在发展农林生物质发电方面在秸秆剩余物资源较多、人均耕地面积较大的粮棉主产区，有序发展秸秆直燃发电，提高发电效率；在重点林区和林产品加工集中地区，结合林业生态建设，利用林业三剩物和林产品加工剩余物发展林业生物质直燃发电，结合能源林种植，建设林电综合利用工程；结合防沙治沙，建设灌木林种植基地，发展沙生灌木平茬剩余物直燃发电及综合利用工程；在甘蔗种植主产区和蔗糖加工集中区推进蔗渣直燃发电。鼓励将生物质发电与纤维素乙醇、生物柴油及生物化工相结合，实现生物质梯级利用。鼓励发展生物质热电联产，提高能源利用效率。2015 年，农林生物质发电装机容量达到 800 万千瓦。

(2) 在城市垃圾发电方面，结合城市生态环境保护选择适宜的生活垃圾、污水处理厂污泥处理及能源利用方式，推进垃圾处理减量化、资源化、无害化。在人口密集、土地资源紧张的中东部地区城市，合理布局生活垃圾焚烧发电项目。在西部地区采取垃圾填埋方式处理垃圾的城市建设填埋场沼气发电项目，大力推动垃圾发电关键设备和清洁燃烧技术的进步。2015 年，城市生活垃圾发电装机容量达到 300 万千瓦。

(3) 在沼气发电方面，在农村生物质资源比较丰富、人口密集的乡镇，发展分布式生物质燃气发电项目；依托大型畜禽养殖场，结合污染治理，建设大型畜禽养殖废弃物沼气发电项目；积极推动造纸、酿酒、印染、皮革等工业有机废水和城市生活污水处理沼气发电项目。2015 年，沼气发电装机容量达到 200 万千瓦。生物质发电总装机容量达到 1300 万千瓦，年发电量 780 亿千瓦时，年替代石化能源 2430 万吨标准煤<sup>[10]</sup>。

#### 2. 加快发展非粮生物液体燃料

建设非粮能源原料基地，在盐碱地、荒草地、山坡地等未开发荒地较多的地区，根据当地自然条件和作物植物特点，种植甜高粱、木薯、油棕、小桐子等能源作物植物，建设非粮生物液体燃料的原料供应基地。“十二五”期末，建成油料能源林基地 200 万公顷。

建设非粮生物液体燃料示范工程，在“十二五”时期，建设一批产业化规模的纤维

素乙醇示范工程，建成纤维素酶批量生产基地。突破关键设备和集成工艺，提高成套设备制造能力，降低纤维素乙醇生产成本，提高经济性。规范和引导以废弃油脂为原料的生物柴油的产业化，推进木本油料作物为原料的生物柴油和航空生物燃料示范工程。2015年，生物燃料乙醇年产量达到400万吨，生物柴油和航空生物燃料年产量100万吨。年替代石化能源500万吨标准煤<sup>[1]</sup>。

### 3. 积极推广生物质燃气

积极推进生物质燃气集中供气，“十二五”时期，在农林生物质资源丰富、地势易于铺设燃气管网、农民经济条件较好、居住较为集中的乡镇或较大的村庄，推广生物质气化集中供气。在居住区域附近有规模化畜禽养殖场的地区，优先发展沼气集中供气，建设大中型沼气集中供气工程。结合工业有机废水和城市污水处理，建设利用工业有机废水、城市生活污水和污泥中的有机物生产沼气的集中供气工程。“十二五”期末，生物质燃气集中供气达到30亿立方米/年，折合250万吨标准煤。

稳步推进户用沼气建设，在气候适宜、人口居住分散且有家庭养殖畜禽的农村地区，继续推广户用沼气，提供清洁生活燃气。将沼气作为连接种植业和养殖业的纽带，发展“三位一体”、“四位一体”生态农业模式，提高户用沼气的综合效益。2015年，农村沼气用户达到5000万户，年产沼气190亿立方米，折合1500万吨标准煤。

### 4. 推进生物质成型燃料产业化

生物质成型燃料具有原料适应范围广、规模适应性强、易于运输储存等特点，作为供热燃料，是一种经济实用的方式。在“十二五”时期，重点在北方采暖地区推广生物质成型燃料集中供热，结合城市大气环境治理，大力推动城市燃煤锅炉改造为生物质成型燃料锅炉，减少城市燃煤量，扩大规模化的生物质成型燃料市场；在人口居住分散、不宜铺设燃气管网的农村地区，推广使用生物质成型燃料，解决炊事及采暖用能。2015年，生物质成型燃料年利用量达到1000万吨，相应替代石化能源500万吨标准煤。

## 1.3 生物质能的示范工程和重点工程

### 1.3.1 生物质能的综合利用产业化示范

借鉴欧美国家生物质能发展的经验，我国将建设一批梯级综合利用生物质能示范项目和若干个示范区，推动生物质能利用从单一原料和产品模式转向原料多元化、产品多样化的循环经济梯级综合利用模式，使生物质资源利用获得更好的综合效益。

### 1. 纤维素原料生物燃料多联产示范工程

积极推动农林剩余物（纤维素）生产生物乙醇为主产品的综合利用产业化示范。建设纤维素生物燃料综合利用示范区，利用当地丰富的农作物秸秆资源，建设产业化规模纤维素水解制备液体燃料和生物基化工产品及醇电联产综合利用示范工程。

中国科学院过程工程所陈洪章研究员主持的“秸秆等木质纤维素原料炼制关键技术与产业示范”项目，从原料多组分特性、转化过程集成和结构与功能入手，提出“选择性组分拆分——功能经济性利用”的生物质炼制新途径实现秸秆等生物质分层多级转化集成的研究思路，实现秸秆等木质纤维素原料的全组分生物炼制，整套技术及其工艺达到国际领先水平。

依托示范项目，推进生物乙醇及其他替代石油基原料的化工产品的规模化生产，废水经厌氧发酵处理生产沼气及沼气发电，或者利用废水培养微藻能源作物，最终的生物质残渣用于燃烧发电和供热，整体实现生物质梯级综合利用。

由中南林业科技大学承担的“林木纤维乙醇生物共转化关键技术创新与示范”项目在长沙启动。中南林业科技大学牵头与中国林科院林产化学工业研究所、常德联合生物能源研究所、陕西德融科技信息发展有限公司 3 家项目协作单位，共同攻克生物乙醇制备技术的难题。

### 2. 微藻生物燃料多联产示范工程

在条件适合地区，利用工业废水及富含  $\text{CO}_2$  废气，采用先进养殖技术，建设含油微藻规模化养殖场，开展微藻生物燃料多联产示范。

依托示范项目，推进商业化规模的微藻生物燃油生产，同时生产高附加值的营养藻粉和饲料藻渣等生物基产品。通过微藻生物燃料多联产，实现  $\text{CO}_2$  减排、工业污水处理与生物能源制备、生物基产品开发的有机结合，建设多产业组合的循环经济示范基地。

2012 年 7 月，我国首个以炼厂  $\text{CO}_2$  废气为碳源的“微藻养殖示范装置”在中国石化石家庄炼化分公司建成并投入运行。微藻养殖示范基地占地 500 平方米，可以很好满足微藻养殖的环境条件，保证  $\text{CO}_2$  减排与微藻养殖试验的开展。示范基地各项功能齐全、运行正常，可以进行连续规模化微藻养殖、采收、生物质抽提等全流程试验，为微藻生物质能源的技术开发提供示范，也为实现利用微藻养殖减排炼厂烟气  $\text{CO}_2$  20% 的目标奠定了技术基础。

中国石化石家庄炼化微藻养殖示范基地的建成，为炼厂  $\text{CO}_2$  减排与微藻生物能源技术的开发奠定了基础。该技术的成功开发将为我国实现 2020 年单位国内生产总值  $\text{CO}_2$  排放下降 40% ~ 45% 的目标提供支撑。

### 3. 生物质热化学转化制备液体燃料及多联产示范工程

加快生物质气化合成醇醚、生物质热解液化及直接催化转化制备烃类燃料技术进步，



建设生物质热化学制备液体燃料产业化示范区，利用各类农林剩余物资源，开展万吨级生物质热化学制备液体燃料，以及燃气、热力、电力、生物质炭、多元醇生物基化学品等多联产系统示范工程，实现低成本规模化生物质资源梯级综合利用。

依托示范项目，突破大型生物质气化、先进高效净化与组分调变一体化、生物油炼制加工催化剂及相应的反应精馏分离等关键技术，降低生物燃料生产成本。结合化工项目工程和工业园区用热需求，整合生物化工技术开展综合精炼，生产生物柴油、石脑油和航空煤油等生物燃料，以及热力、电力、精细化工原料和产品、医药产品等系列化产品，拓展相关产品应用市场，全面推进各类农林生物质资源梯级综合利用，提升生物质能及综合利用的经济性和竞争力。2015年年底，形成若干以农林剩余物为原料的生物质热化学转化制备液体燃料及多联产循环经济产业示范区。

#### 4. 大型沼气综合利用示范工程

加快大型沼气工程技术进步，提高大型沼气生产成套设备、沼气净化设备、沼气管道供气 and 罐装成套设备制造水平。在具备资源、市场等条件的地区，建设大型混合原料沼气综合利用产业示范区，将沼气输入城市天然气管道网络。在乡镇布设沼气供应服务站点，以供应罐装沼气的方式为周边居民提供生活燃气；探索沼气作为城市公共交通工具燃料的利用方式；推动大型沼气管道的沼液沼渣综合利用，拓展有机肥市场，支持有机蔬菜、水果种植产业发展，发展大型沼气综合利用循环经济生态园。

### 1.3.2 生物质能的发展重点工程

#### 1. 城市生物质供热工程

结合城市大气环境治理和新能源示范城市建设，在城市推广生物质成型燃料和专用锅炉，替代区域集中供热及分散锅炉燃煤。

“十二五”时期，在生物质资源稳定供应、有采暖需求的北方城市建设生物质供热工程，利用农林剩余物、城市生活垃圾及有机污水、养殖场畜禽粪便等资源，采用生物质成型燃料采暖锅炉、生物质燃气供热锅炉等技术，综合发展各类生物质供热，减少城市中的煤炭直接燃烧，改善大气环境和城市面貌。

2015年，年供热消耗生物质燃料10万吨以上的城市达到50个，平均每个城市生物质供热总面积达到100万平方米以上，相应每个城市平均每年替代石化能源5万吨标准煤。全国生物质供热总面积达到5000万平方米，相应年替代石化能源250万吨标准煤。

#### 2. 农村生活燃料清洁化工程

将生物质能技术作为实现农村生活用能优质化、清洁化、现代化，促进城乡能源公共服务均等化的重要手段。“十二五”时期，结合绿色能源示范县建设，推广农村生活燃料

清洁化工程，充分利用当地农作物秸秆、畜禽粪便、林业剩余物等生物质资源，推广生物质热解气化、生物质干馏、生物质成型燃料、大中型沼气工程和户用沼气池、省柴灶等技术，为当地居民提供清洁生活燃料。

在生物质资源比较丰富、农村居民集中的地区，建设生物质燃气集中供气工程，铺设生物质燃气管网，推进农村燃气物业化管理和服务。在具有采暖需求的北方农村，重点推广生物质成型燃料采暖技术。在林区及退耕还林地区，结合生态保护工程，重点发展分布式生物质能技术，充分利用林业剩余物建设生物质气化和成型燃料项目，为林区提供清洁的生活燃料，减少林木质燃料消耗，巩固退耕还林成果。积极支持在农村学校、医院等公益设施和公用机构推广应用清洁生物质燃料。2015 年，农村生活燃料清洁化工程惠及 1000 个乡镇、100 万户农户，年替代石化能源 100 万吨标准煤。

### 3. 生物质能源作物和能源林基地建设

按照“不与民争粮，不与粮争地”的要求，根据我国土地资源和农林业生产特点，立足非粮原料，结合现代农林业发展和生态建设，在有条件的地区实施生物质能源作物和能源林种植工程，合理选育和科学种植能源作物植物，因地制宜开发边际性土地，规模化种植各类非食用粮糖油类作物植物，建设生物质能原料供应基地。

重点在“三北”地区的半荒漠化区、沙区等边际性土地，结合生态环境，建设以灌木林为主的木质能源林基地；在东北、内蒙古、山东等地区开展甜高粱规模化种植；在广东、广西、海南、江西、四川、云南等地种植薯类作物，以及芭蕉芋、葛根等植物；在海南、福建、四川、贵州、云南、河北等地建设油棕、小桐子、黄连木等油料植物种植基地；加强富油藻类培育技术研发，开展藻类原料培育工程。

2015 年，建成木质能源林基地 520 万公顷，甜高粱原料基地 50 万亩，木薯等薯类作物基地 800 万亩，油料能源林基地 200 万公顷，其他非粮原料（能源草等）基地 30 万亩。种植能源作物和能源林满足年产 100 万吨生物柴油的原料需求，年替代石化能源 140 万吨标准煤。

## 1.4 发展生物质能的效益和前景

为应对全球气候变化、国家能源安全等挑战，我国将发展生物质能作为替代石化能源、保障能源安全的重要战略措施。积极推动生物质能的开发利用，生物质能将在我国能源安全、减排中发挥更加重要的作用<sup>[4]</sup>。

### 1. 能源效益

到 2020 年，全国生物质能开发利用量分别相当于 3 亿吨标准煤和 6 亿吨标准煤，可大大减少煤炭消耗，弥补石化燃料资源的不足。初步估算，生物质能达到 2020 年的利用

量时,年发电量相当于替代煤炭约6亿吨,沼气年利用量相当于240亿立方米天然气,燃料乙醇和生物柴油年用量相当于替代石油约1000万吨,太阳能和地热能的热利用相当于降低能源年需求量约7000万吨标准煤。生物质能的开发利用将对改善能源结构和节约能源资源起到重要作用。

## 2. 环境效益

生物质能的开发利用将带来显著的环境效益。达到2020年发展目标时,生物质能年利用量相当于减少二氧化硫年排放量约800万吨,减少氮氧化物年排放量约300万吨,减少烟尘年排放量约400万吨,减少二氧化碳年排放量约12亿吨,年节约用水约20亿立方米,可使约3亿亩林地免遭破坏。

## 3. 社会效益

开发利用生物质能,是发展循环经济的重要内容,也是促进农村发展和农民增收的重要举措。到2020年,将利用生物质能累计解决无电地区约1000万人口的基本用电问题,改善约1亿户农村居民的生活用能条件。农作物秸秆和农业废弃生物质的能源利用可提高农业生产效益,预计达到2020年开发利用规模时,可增加农民年收入约1000亿元。农村户用沼气池和畜禽养殖场沼气工程建设将改善农村地区环境卫生,减少畜禽粪便对河流、水源和地下水的污染。生物质能的开发利用将促进农村和县域经济发展,提高农村能源供应等公用设施的现代化水平。

能源林建设、林业生物质及木材加工废弃物的能源利用可促进植树造林和生态环境保护,预计林业领域生物质能的利用达到2020年目标时,可增加林业年产值约500亿元。处理城市生活污水和利用工业生产废水处理沼气可促进循环经济发展。生物质能的开发利用、设备制造和相关配套产业可增加大量就业岗位,到2020年,预计生物质能领域的从业人数将达到200万人。

生物质能的开发利用将节约和替代大量石化能源,显著减少污染物和温室气体排放,促进人与自然的协调发展,对全面建设小康社会和社会主义新农村起到重要作用,有力地推进经济和社会的可持续发展。

## 参考文献

- [1] 许春燕. 热解法生产生物质油过程中水相成分的研究 [D]. 郑州大学, 2012.
- [2] 黄可嘉. 促进我国能源可持续发展的税收政策问题研究 [D]. 首都经济贸易大学, 2009.
- [3] 闫璐明. 电力社会普遍服务资金补偿机制研究 [D]. 华北电力大学(北京), 2007.
- [4] 可再生能源中长期发展规划 [C]. 2008年山西省可再生能源开发利用研讨会论文集, 2008:6-21.
- [5] 刘灿伟. 我国低碳能源发展战略研究 [D]. 山东大学, 2010.
- [6] 吕正凯, 赵兰萍, 黄维, 等. 直接空冷凝汽器单元流场分析 [J]. 发电与空调, 2014, 35(1): 72-77.

- [7] 赵兴涛. 生物质成型燃料设备的模块化设计与陶瓷耐磨材料的应用 [D]. 河南农业大学, 2013.
- [8] 刘文合. 基于可再生能源利用的农村住宅技术系统设计研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [9] 王学谦. 日本构建低碳社会的方法与路径研究 [D]. 浙江工业大学, 2013.
- [10] 张伟波, 潘宇超, 崔志强, 等. 我国新能源发电发展思路探析 [J]. 中国能源, 2012, 34(4): 26-28, 41.
- [11] 李博. 生物燃料行业反垄断规制研究 [D]. 对外经济贸易大学, 2014.

第 2 章

生物质能产业与政策分析



长期以来,大量能源消耗使石化能源渐趋枯竭,同时,温室气体给环境造成巨大压力,使得石化能源的替代品——生物燃料受到了世界的广泛关注。为减少对石油的依赖并改善气候问题,各国纷纷加大了生物燃料的发展力度。

在扶持生物燃料的发展过程中,许多国家对生物燃料生产、销售推出了多项鼓励政策,这些政策的共同之处就是对生物燃料提供补贴、减免税赋。这些政策的主要目标有三点:一是通过促进可再生能源的发展、生产与使用,减少温室气体排放,从而减缓气候变暖;二是通过扩大生物能源作物种植,增加农民收入并促进农村经济发展;三是通过降低对进口石油的依赖,提高能源安全水平。

21 世纪初,为解决大量库存粮食的积压问题,我国政府通过直接投资的方式,以陈化粮为生产原料对燃料乙醇进行开发。2006 年后,出于对粮食安全的考虑,政府不再批准设立新的以粮食作物为原料生产燃料乙醇的企业。之后出台的一系列法规政策具有如下限定:用于生物乙醇的原料定位为甘蔗、木薯、甜高粱等;用于生物柴油的原料定位为油料作物、油料林木果实、油料水生植物等非食用油脂,此后我国生物质资源尤其是液体燃料的原料资源发展重点转移到非粮食作物上来。

作为新兴行业,生物能源的发展水平直接受国家政策影响,需要国家政策、资金的扶持,各国的生物燃料产业发展初期都由政府引导。因此,学习和借鉴成熟经济体的发展经验,能为我国生物燃料产业的发展提供政策参考。

## 2.1 国外生物能源发展现状

近几年世界生物燃料发展十分迅猛,尤其是以美国、欧盟及巴西等为主的一些国家把发展生物燃料(主要包括生物乙醇和生物柴油)作为解决能源问题的一条重要途径,制定了具体的发展目标,并采取了相应的政策措施。美国、欧盟和巴西的生物燃料产量占世界总产量的 80% 以上。为推动生物能源的发展,各国相继出台了一系列生物燃料扶持政策<sup>[1]</sup>。

### 1. 欧盟

欧盟既是能源消耗重地,也是能源进口大国。2012 年 11 月 13 日,《2012 欧洲生物能源展望》对欧洲能源发展情况进行了统计分析。报告指出,欧盟能源产量为 8.3 亿吨石油当量,能源净进口达 9.53 亿吨石油当量,能源消费总量达 17.59 亿吨石油当量,欧盟能源产量仅能满足其能源需求的 48%。多年来欧盟能源对外依存度居高不下,2010 年欧盟煤炭、石油和天然气的对外依存度分别高达 59%、62% 和 84%,因此,大力发展包括生物能源在内的可再生能源对保障欧盟能源安全至关重要。

从再生能源的发展来看,2010 年欧盟可再生能源消费总量达 1.52 亿吨石油当量,占能源消费总量的 10%,占终端能源消费总量的 12.4%。其中生物质能源消费总量达 1.18 亿吨石油当量,约占可再生能源消费总量的 77.6%,占欧盟所有能源消费总量的 8%。在电力行业,生物质发电占欧洲可再生能源发电的 16.85%,欧洲 63.59% 的热电联产由生物



质能提供。在供暖行业,生物质能供暖占可再生能源供暖的93%,满足了欧洲总体供暖能源需求的12.9%。在交通行业中,2010年欧洲交通行业消耗的生物燃料达1320万吨石油当量,约占交通行业消耗燃料总量的3.63%。

为了确保能源独立,欧盟提出要在提高能源效率的同时,确保能源种类多元化,通过发展“替代能源”,来保证欧盟的能源安全。

欧盟各国在推动可再生能源产业化的进程中,采取的做法通常是政府科技投入先行,随后进行市场开拓,以此来推动产业化进程。同时欧盟相继推行了一系列能源政策:1995年,欧盟发表了《能源政策绿皮书》,以此为基础,1997年欧洲确定了欧盟在能源结构中增加可再生能源比例的行动纲领,提出可再生能源占一次能源消费中的比例将从1996年的6%提高到2010年的12%,可再生能源电力装机容量在电力总装机容量中的比例也将从1997年的14%提高到2010年的22%。根据1997年欧盟制定的《可再生能源白皮书》,2010年欧盟可再生能源占整个能源的比重达到12%,比1998年的6%翻一番。2006年通过了《欧盟未来三年能源政策行动计划》(2007—2009年),提出要提高能源效率,以达到欧盟到2020年减少能源消耗20%的目标,要求各成员国要明确节约能源的“责任目标”,依照各国的经济与能源政策特点,确定主要的节能领域以便迅速落实措施<sup>[2]</sup>。2007年欧盟确立《能源与运输发展战略》,在交通运输领域提高能效,支持替代能源和可再生能源的研究,鼓励广泛的节能与减排研究;2008年12月,欧盟能源气候一揽子计划颁布,要求到2020年将温室气体排放量在1990年的基础上至少减少20%,将再生清洁能源占总能源消耗的比例提高到20%,将煤、石油、天然气等石化能源消费量减少20%。2009年5月,欧洲《可再生能源指令》正式开始生效,指令对生物燃料使用进行了强制性要求:“在2020年之前,每个成员国应确保国内交通用途的可再生能源消耗量,至少要占总交通能源消耗量的一成。”

在低碳经济的推进中,欧盟各成员国一直扮演着积极的角色,争先恐后发展低碳经济。各成员国相继制定了可再生能源发展的阶段性目标,德国和英国更是展开了激烈的角逐,德国和英国承诺,到2010年和2020年,可再生能源发电量的比例将分别达到10%和20%。

德国的可再生能源行业起步早、发展快。早在2000年4月,德国就开始实施《可再生能源法》,规定到2020年把风能、生物质能、水能和太阳能的发电量提高10%,使其占德国总发电量的20%。此后又相继出台了促进生物燃料、地热能等可再生能源发展的相关法律,大大促进了可再生能源的研究和应用。2010年1月,时任德国环境部长的诺贝特·罗特根更是公开宣布:“到2050年,德国的能源消耗几乎可全部源自可再生能源。”在生物柴油方面,2006年德国生物柴油产量占欧盟生物柴油总产量的52.4%。自2000年以来,欧盟生物柴油产量以每年28.2%的速度快速增长。根据德国能源和水利联邦协会的统计,2009年底德国可再生能源的发电量占德国电力消耗的16%,2012年德国23.6%的电力消耗来源于可再生能源,约31%的可再生能源电力来自生物质电力,其中2/3以上的生物质电力来自沼气。2013年,德国沼气发电厂建成7750个左右,发电装机容量3450兆瓦左右。

2003年发布《英国政府未来的能源——创建低碳经济体》白皮书,宣布到2050年英

国将转变为低碳经济型国家，英国将在欧洲乃至全球能源科技和能源市场的稳定、可持续、有益环保中，发挥主导作用。2009年7月15日，英国公布了详尽的《英国低碳转型》国家战略方案，该方案是英国到2020年的行动路线图，它要求所有方面都向低碳化方向发展。在能源方面，到2020年可再生能源在能源供应中要占15%的份额，其中40%的电力来自低碳领域。2009年11月，英国能源与气候变化部公布了能源规划草案，该草案明确提出，核能、可再生能源和洁净煤是英国未来能源的三个重要组成部分<sup>[3]</sup>。

以生物质能为代表的可再生能源，环境污染低，可永续利用，发展可再生能源是欧盟能源政策中心的目标。随着技术的发展，从中长期来看，可再生能源在经济上的竞争力不亚于传统能源。可再生能源可以减少CO<sub>2</sub>的排放量，增加能源供应的可持续性，改善能源供应的安全状况，减少欧共体日益增长的对进口能源的依存度。

## 2. 美国

自1957年以来，美国能源自给率一直下降，直至2005年降至69.2%，此为历史最低点。近年来，美国爆发页岩气革命，使得国内能源生产总量不断上升，一次能源自给率逐年上升。根据2014年世界能源统计年鉴显示，2013年美国各种一次能源消费中，原油占37.4%、天然气占28.2%、煤炭占20.5%、核能占8.5%、水力发电占2.8%、可再生能源等占2.6%。

随着1970年石油危机的出现，美国能源部开始考虑如何确保能源供应的安全性和可靠性，并在1998年颁布的新能源发展战略中明确指出，投资于基础科学和新技术以扩大未来新能源的可选择范围。2002年布什签署了《美国农业法令》，鼓励联邦政府通过采购、直接投资以及项目贷款等方式支持生物质能产业的发展。2004年《美国创造就业法案》对生物柴油给予税收鼓励，并针对燃料乙醇扩大了课税扣除的范围。2005年签署的《国家能源政策法案》规范了可再生燃料标准，明确指出在汽油中加入可再生燃料比例应该逐年递增。2006年美国能源部公布《美国能源部战略计划》，确认并强化了能源政策变化趋势，指出发展可再生能源，研发替代能源，打造多元化能源格局，以及大力发展以天然气和核能为主的清洁能源。在2007年美国国情咨文中又提出能源新战略，美国将减少对进口石油的依赖，并大幅提高战略石油储备量。2013年2月19日《美国清洁能源安全法案》通过，要求到2020年时，电力部门至少有12%的发电量来自风能、太阳能等可再生能源，同时法案还规定美国到2020年将使温室气体排放量在2005年的基础上减少17%，到2050年减少83%，同时提高生物质能、风能、太阳能等清洁能源的使用。美国政府在未来10年将投入1500亿美元，资助替代能源的研究，包括乙醇燃料、混合燃料的动力汽车研发等。

2014年美国在风能、太阳能与可再生能源领域的投资高达2500亿美元。在2009—2014这5年中，美国可再生能源的年均销售额上升了49%，而石油、天然气以及煤炭的销售额仅上升了9.4个百分点。2013年美国可再生能源发电量攀升至创纪录的252万千瓦时，石油发电量降至1300万千瓦时，较2003年的水平下降88%。从发展趋势来看，可再生能源产业的持续发展将会使其生产成本不断降低，世界经济对石油的需求也将不断下



降。美国的生物能源政策主要出于三方面的考虑。作为世界上温室气体排放量最大的国家，美国在应对气候变化问题上的立场和举措对国际社会具有重要影响。

### （1）改善现有能源消费结构，降低石油进口依存度

美国人均石油消费量世界第一，且需求量持续高速增长，考虑到能源安全，必须改变目前的能源消费结构，向能源多元化和清洁能源方向发展。美国具有发达的农业，生物质能原料供应充足，成本低廉且相对稳定，有巨大的发展潜力和广阔的市场前景。从能源当量来看，生物质能仅次于煤炭、石油和天然气，存量丰富且可再生。在所有新能源中，生物质能与现代工业化技术、现代化生活有很大的兼容性，对常规能源有很强的替代能力。这是美国能源政策的基本出发点。

### （2）减少二氧化碳排放，改善生态环境

在生物质能源的使用过程中不会产生大量的二氧化碳，而且绿色植物在进行光合作用时还要吸收大量的二氧化碳，可明显降低空气污染和减少酸雨现象。发展生物质能源，以生物质燃料替代煤炭，可减少二氧化碳排放；以生物燃油替代石化燃油，可减少碳氢化物、氮氧化物等对大气的污染。这都将对改善能源结构、提高能源利用效率、减轻环境压力做出巨大贡献。

### （3）增加美国农业部门的收入

美国玉米产量和出口量都居世界第一，美国玉米产量占全球近40%，出口量占全球玉米出口的60%左右，因而玉米乙醇工业的发展可以有效增加美国农户的收入<sup>[4]</sup>。

为鼓励美国农民多种玉米，美国政府还给予农民每加仑燃料乙醇51美分的补贴，并对进口燃料乙醇征收每加仑燃料乙醇54美分的关税。据美国《能源政策法案》，计划到2010年，美国用近30%的粮食来生产生物能源，到2022年，美国的生物能源使用量将达到360亿加仑。在2007年1月10日公布的一份报告中，美国提出了2027年的乙醇燃料保证20%汽油市场的目标，为了实现这个目标将创造1100亿美元的经济增长，节约500亿美元的石油进口，创造240万个就业岗位。美国推动生物能源战略可谓一举多得，既支撑了粮食价格、提高了农业收入、化解了粮食生产过剩的矛盾，减轻了财政负担，还完成了美国农业政策的基本目标。

美国是农业大国，农产品产量大大超出了其国内市场需求，美国粮食产量占世界总产量的36%以上，玉米（40%）、大豆（50%）产量均居世界第一。从罗斯福政府以来，历届美国政府通过促进农产品消费的方式，促使农产品价格全面上涨，以提高美国农业部门的收入。目前，美国生产乙醇的主要原料为玉米，生产生物柴油的主要原料为大豆油。2012年，美国生产乙醇消耗玉米1.25亿吨，比当年世界玉米出口总量还要多3400万吨，美国生物乙醇汽油约占汽油消耗总量的10%。

美国的生物能源政策在保证本国能源多元化的同时也抬升了世界粮食价格，对世界粮食安全和价格体系造成一定冲击。由于美国是世界最大粮食生产国和出口国，因而美国乙醇工业的发展，在拉动玉米价格上涨的同时，也通过比价关系，推动了其他粮食品种的价格上涨。

从世界范围看，全球仍有许多国家的人民正处于饥饿状态，但是美国却将大量的玉米

拿来生产燃料乙醇，美国新能源法案因此也饱受争议。

近年来，国际农产品因受到生物质能源产业、投机资本等非传统因素的影响而产生价格波动。由于部分生物能源产业以农作物为原料，生物质能源发展大幅增加了农产品的非传统需求，而且国际粮食市场与能源市场的价格通道已经被打通，使农产品市场受能源市场变化的影响不断加深。传统意义上，国际大宗农产品市场是准垄断市场，世界70%~80%的大宗农产品贸易由少数国际跨国公司掌控。比如美国的跨国公司和期货市场国际大宗农产品市场拥有很强的话语权，生物质能源的发展使得主要粮食出口国对大宗农产品贸易的掌控能力进一步增强。美国通过粮食大规模的生产生物燃料，促进了该国能源结构的多元化。同时，也进一步强化了美国对国际农产品市场的影响力。

### 3. 巴西

巴西是全球生物燃料的第二大生产国，2008年3月巴西的生物乙醇已替代了该国50%的汽油，是世界上唯一在全国范围内不供应纯汽油的国家。巴西主要发展以甘蔗为原料进行燃料乙醇生产，燃料乙醇产量居全球第二。1973年爆发石油危机，同时国际市场上糖价下降，巴西利用本国甘蔗产量高、成本低的原料优势，鼓励利用甘蔗生产乙醇以替代汽油，通过经济补贴推广燃料乙醇的使用，逐步降低对石化能源的依赖。1975年11月巴西政府颁布“国家乙醇计划”法令，燃料乙醇工业开始规模化生产。同时，联邦政府成立了专门机构，开始制造以燃料乙醇作为燃料的车辆，20世纪80年代，巴西乙醇产业达到巅峰。80年代末，国际油价出现下跌，糖价又上涨，政府逐步取消补贴，燃料乙醇产量的增长势头逐渐减缓。自1999年以来，巴西政府放开了对燃料乙醇零售价格的管制，2002年燃料乙醇价格完全自由化，2003年开始引入灵活燃料汽车，进一步增加了燃料乙醇的市场需求。21世纪初，巴西燃料乙醇工业发展再次进入快车道。目前，巴西全国超过33 000个加油站提供乙醇燃料，有近400万辆汽车使用燃料乙醇。截至2013年，巴西生物乙醇的产量约1880.1万吨，占全球总产量的26.75%。

结合本国的资源特点，巴西选择燃料乙醇作为替代能源的发展重点，在燃料乙醇的生产、消费领域给予大量的政策扶持。

在生产环节，巴西为燃料乙醇的生产企业提供低息贷款，国家政策性银行设立了生物燃料专项基金，提供最高可达90%的融资信贷。在1980—1985年，巴西政府向生物乙醇企业提供了20多亿美元低息贷款，约占投资总额的29%；为保证生物质燃料生产的原料供应顺利，政府还专门为直接从事能源作物种植的农户设立了专项信贷资金。与此同时，巴西政府还通过吸引外资，使农民从国际金融机构得到大量贷款。

在消费环节，巴西规定对汽车实行不同比率的燃料税收政策，依据汽车使用的乙醇和汽油掺混比例的不同，征收的税率有所区别，鼓励发展燃油乙醇的使用。从1982年开始，政府对生产燃料乙醇汽车减征5%的工业产品税，州政府在联邦政府减税的基础上，再对燃料乙醇汽车减征1%的增值税，甚至可减免全部增值税。巴西《联邦11727法案》规定，生物燃料乙醇的生产企业和销售商的总纳税额不得超过9.25%，政府对生物燃料乙醇产业链上的所有产品都有减免征税政策，并给予燃料乙醇生产企业和乙醇加油站税收优

惠。此外，巴西国家石油公司对燃料乙醇按政府规定的价格收购，将燃料乙醇的市场零售价格控制在低于汽油价格的水平，并在发展初期限制生物乙醇进口量，确保国内生产的燃料乙醇产品有市场需求。为了扩大燃料乙醇的消费，政府强制规定石化燃料要与生物燃料勾兑使用。巴西是目前全球燃料乙醇汽油添加比例最高的国家。同时，巴西联邦法律明文规定，政府一级单位在采购、换购轻型公用车时，必须购买包含乙醇燃料的可再生燃料使用设备的汽车。

## 2.2 国外政策经验对我国的启示

我国生物燃料产业起步较晚，在借鉴国外经验的同时，结合我国的实际情况，制定出可持续发展的产业政策，发展我国生物燃料产业。

### 1. 警惕粮食安全和价格波动问题

目前世界上主要生产的是以玉米为主要原料的第1代燃料乙醇（见图2-1），以木薯等为原料的第1.5代燃料乙醇，以及以农产品废弃物等为原料的第2代燃料乙醇。



图2-1 燃料乙醇的主要原料——玉米

2012年，在应对全球粮价飙升的二十国集团（G20）快速反应论坛（RRF）上，联合国利用这场会议推动一场关于生物燃料政策的全球性讨论，要求美国、欧洲国家废除由政府指定的生物燃料生产目标。联合国粮农组织总干事达席尔瓦已发出警告，指责在干旱的影响下，玉米产量遭到“巨大破坏”，但因美国国会颁布的指令，40%的玉米生产量仍用于乙醇生产。根据联合国粮农组织的数据显示，从2005—2008年年初，世界粮价的暴涨风潮席卷全球，涨幅为二战之后的最高点。现面临饥荒的人口总数已超过10亿人，其中每年约有1500万人因缺粮死亡，需要粮食援助的穷人每年新增约1亿人，在未来几年内，这一数字还将持续上升<sup>[4]</sup>。

2008年7月，世界银行专家唐·米切尔发布对全球粮价上涨的研究报告，他认为美国和欧盟对生物燃料的追求对粮食供应和价格的影响最大（见图2-2），这一数值也远超原先的估计。生物燃料的生产从三个方面扭曲了粮食市场：第一，它把粮食用作燃料，美国

1/3 以上的玉米用于乙醇的生产，欧盟大约一半的蔬菜用来生产生物柴油；第二，农民被鼓励留出土地生产生物燃料作物；第三，它刺激了对粮食的金融投机，致使粮价越涨越高。总而言之，美国发展生物燃料推动了粮价上涨<sup>[4]</sup>。



图 2-2 生物乙醇推高粮食价格

中国是能源消费大国，对能源有迫切需求，发展生物能源和促进能源供应多元化是保障国家能源安全的重要举措，中国生物燃料长期稳定的发展必须建立在粮食安全基础之上。因此，在生物能源发展过程中，我国应严格依照“不与民争粮、不与粮争地”的基本准则，积极开发利用边际土地，发展非粮原料的生物质能的生产，如以木薯、甜高粱等为代表的糖类作物，和以农作物秸秆为代表的各类木质纤维类生物质等作为生物乙醇的生产原料。目前，亟待探索非粮原料的选择和培育，加快非粮原料的转化技术研发进度，以实现产业升级和长期发展。

## 2. 加强国际对话合作

生物燃料产业正在全球化发展，中国作为发展迅速的生产国和潜力巨大的消费国，应该积极加入到国际生物燃料的合作中：一方面，我们要进行国际经济技术合作，努力学习美国、巴西和欧盟的科学技术，结合国内生物资源的特点，开发出适合中国大规模生产的生物质能原料，发展有中国特色的生物燃料产业；另一方面，我们要积极主动参与有关生物液体燃料的国际对话、政策协商与谈判，积极参加国际生物燃料社会环境效应的评价工作。

## 3. 完善法规标准，配合一定的财政支持

我国应建立并完善符合非粮生物燃料特点的产业扶持和市场监管政策体系，有序开展试点示范工作，并稳步扩大生物燃料市场。在原料方面，农户对原料作物种植意愿不高，应给予试点原料生产者一定补贴以提高农民的种植意愿；在加工环节，我们技术不成熟，政府和相关机构应加大研发力度，降低转化成本，同时制定相应的生产标准规范生产，尽快通过突破性的科技进步实现扩大生产；在市场方面，通过指令性的强制混配或差别化的税收政策来增加生物燃料产品的市场需求，在一定程度上消除非粮生物燃料的市场风险。

## 4. 推行强制配额制和绿色证书制

所谓强制配额制是指能源企业在生产或销售常规电力的同时，必须按规定生产或销售



一定比例的可再生能源；所谓绿色证书制是指政府对企业的可再生电能核发绿色交易证书，绿色交易证书可以在能源企业间买卖，价格由市场决定，政府通过配额制明确了可再生能源的发展目标，并将该目标分解到相关责任方，同时以市场化绿色证书交易机制和严厉的处罚措施作为保障，从而保证实现既定的发展目标。通过引入可交易的配额制等强制性市场份额政策，培育合理的生物质能消费市场。

借鉴国际上生物质能源的发展经验，在生物质能源产业发展的起步阶段，配额制政策的推出非常重要。通过规定绿色能源的供给比例，来提高企业发展清洁电力的动力。同时，通过绿色证书的交易可以筹集发展清洁电力所需的资金。例如，1997年美国政府就规定电力供应商每年所提供一定比例来自可再生能源产生的电力。英国也有类似的规定，英国是最早大规模推行可再生能源配额制的国家之一，在2000年以前，实行非石化燃料公约时，由于缺乏相应的惩罚和强制性，英国的可再生能源发展缓慢。英国实行配额制后，英国的可再生能源的装机容量大幅增加。巴西政府通过立法手段强制推广乙醇汽油的使用，规定在全国所有地区销售的汽油中必须添加一定比例的乙醇汽油。我国的《可再生能源法》只在宏观上规定了可再生能源发电的电价，以及对可再生能源发电的补贴金额，并未强制规定电网公司收购可再生能源企业的发电量配额，更没有在生物质发电总量的比例上做出硬性规定，这不利于生物质发电的推广。

可喜的是，2014年国家发改委办公会原则上通过了配额考核办法，配额考核办法经国务院审定后不久可能就会实施。按我国非石化能源在2020年占能源消费总量15%的阶段目标，我国能源部门会依据各地区可再生能源资源、电力消费、经济发展水平等因素，确定各省（自治区、直辖市）可再生能源电力占全社会用电量的比重指标。我国可再生能源配额考核实施在即，这对于清洁能源发展而言是莫大的利好。同时，《可再生能源法》中规定的全额保障性收购制度也有望通过配额制得到落实。

## 2.3 我国能源政策的发展历程

### 1. 我国能源政策的历史沿革与特点

自1949年以来，我国政府制定了一系列的能源政策。政策的制定大致经历了计划经济时期、经济体制转轨时期和新世纪初期三个阶段。

#### （1）计划经济时期的传统能源政策分析

在计划经济时期，能源供给不足是制约我国经济增长的主要瓶颈之一，扩大能源供给数量是该时期的能源政策重点。能源分配体系主要服务工业部门，在1978年《中共中央关于加快工业发展若干问题的决定》中提出把发展燃料、动力、原材料工业和交通运输放在突出位置，由于能源价格是内定的，能源系统效率较为低下。这一阶段的能源政策带有浓厚的行政命令色彩，政策性通知和办法较多，但也同样因为其政企合一的工业体制，所以管理简单，政令在执行上相对高效。

### （2）经济体制转轨时期的传统能源政策分析

1981—1990年，扩大能源生产、增加能源供给仍是我国能源政策的出发点。从1980年开始，政府将能源效率和节能工作提到了议事日程，确定了“坚持开发与节约并重，把节约放在首位”的能源发展方针。1988年，我国把五年计划中的节约能源计划改为自愿节约和综合利用计划。这个时期，政府制定的节能政策和措施主要是针对工业部门。这是由于我国能源需求的70%以上来自工业，而其中石化、冶金业及化工业等能源浪费极为严重。同时，政府还颁布了一些鼓励各种经济成分共同发展的新能源措施。

改革开放以后，我国大规模发展燃煤发电，由于缺乏相应的环境保护机制，在经济发展的同时付出了高昂的环境成本。在“八五”期间，我国能源工业的经济效益逐渐提高，能源政策的实施取得了明显的成效。1980—1995年，我国能源产量翻了一番，发电量居世界第二，石油产量居世界第五，煤炭产量位居世界第一。1994年后，能源政策的重点从注重发展的数量转向注重增长效益。“九五”期间，我国能源政策的重点有所改变，能源环境和能源效率等问题也逐步受到国家重视。

20世纪90年代，我国陆续出台了《节约能源法》、《重点用能单位节能管理办法》、《节约用电管理办法》等重要法律法规，该阶段的能源政策初步体现了可持续发展的理念。在传统能源的开发方面，提出了“利用国内外两个资源”的口号，国有大型能源企业开始开发海外能源资源，如与中东、俄罗斯、中亚、东南亚等国进行能源方面的合作开发。在能源开发过程中注意到了资源的可持续利用性，包括开发过程中如何合理利用资源，减少对环境不利的影响等。吸取了20世纪80年代“先污染后治理”的经验教训之后，国家环保标准日趋严格。限制和控制能源的过度使用，在保证社会经济可持续发展的同时，也提高了能源利用效率。

### （3）新世纪初期传统能源政策特点分析

新世纪初期，我国能源政策的基本内容可以概括为节能优先、效率为本、多元发展、优化结构、保护环境、立足国内、加强国际互利合作，努力构筑稳定、经济、清洁的能源供应体系，可以看出节能和能效位于我国能源政策的首要地位，并且政府是鼓励能源体系的多元化发展的。

进入新世纪，我国综合国力进一步增强，对能源的需求也不断扩大，但我国能源需求增长过快，给环境和资源造成越来越大的压力，这个时期能源政策开始向重视环保、节能方向发展。在能源供给方面，我国政府努力争取能源供应多元化，加大收购海外资产来保障能源供应安全。在能源价格体系方面，财政部提出了要理顺能源产品价格，抑制能源低成本消费。

在发展生物能源方面，坚持点面结合、整体推进的原则，将近、中、远期目标相结合，既要推动前景好的基础性研究，也要推动技术相对成熟的项目进行产业化发展。同时，积极加强生物能源产业的国际交流与合作，通过与欧美等生物能源产业发达国家的合作，引进先进的技术、资金和经验，开发利用全球的知识储备和人力资源，积极参与生物能源产品的国际标准和国际贸易条约制定<sup>[5]</sup>。

## 2. 生物质能源政策的发展和政策制定

能源价格的飙升会直接影响国家的经济增长和社会可持续发展,近几年原油价格暴涨并居高不下,导致了经济发展和社会运行成本的增加。考虑到传统石化能源的高价位和治理污染的外部成本,生物能源的发展需求更为迫切。发展多元化的能源市场,有利于保障国家能源安全,有利于节能减排,有利于经济的平稳运行。针对国际形势的变化和我国的能源发展需求,从1995年起,国家就出台了一系列再生能源的相关政策,为我国能源结构调整、生物能源的发展奠定了基础。

1995年,国家计委、国家科委、国家经贸委制定《1996—2010年新能源和可再生能源发展纲要》,明确提出按照社会主义市场经济的要求,加快新能源和可再生能源的发展和产业建设步伐。

2000年,国家经贸委颁布《2000—2015年新能源和可再生能源产业发展规划》,系统分析了我国新能源和可再生能源产业化发展的基础、市场开发潜力、预期效益以及发展的制约因素。

2002年6月,《中华人民共和国清洁生产促进法》提出了清洁生产的概念,所谓清洁生产是指不断采取改进设计、使用清洁的能源和原料、采用先进的工艺技术与设备、改善管理、综合利用等措施,要求从源头削减污染,提高资源利用效率,减少或者避免在生产、服务和产品的使用过程中污染物的产生和排放,以减轻或者消除对人类健康和环境的危害,同时制定了财税激励措施和清洁或不清洁生产的产品目录及标准<sup>[6]</sup>。

2005年,《中华人民共和国可再生能源法》颁布,提出通过可再生能源的开发利用,增加能源供应,改善能源结构,保障能源安全,保护环境,实现经济社会的可持续发展。

2006年,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》发布,提出将能源领域可再生能源和生物技术等放在优先发展的位置。

2007年,党的十七大报告中要求“建设生态文明,基本形成节约能源资源和保护生态环境的产业结构、增长方式、消费模式。循环经济形成较大规模,可再生能源比重显著上升。主要污染物排放得到有效控制,生态环境质量明显改善。生态文明观念在全社会牢固树立”,以及“加强能源资源节约和生态环境保护,增强可持续发展能力。必须把建设资源节约型、环境友好型社会放在工业化、现代化发展战略的突出位置,落实到每个单位、每个家庭。要完善有利于节约能源资源和保护生态环境的法律和政策,加快形成可持续发展体制机制。落实节能减排工作责任制。开发和推广节约、替代、循环利用的先进适用技术,发展清洁能源和可再生能源,保护土地和水资源,建设科学合理的能源资源利用体系,提高能源资源利用效率”<sup>[7,8]</sup>。

2007年7月,农业部发布《农业生物质能产业发展规划(2007—2015)》,发展重点包括农村沼气、农作物秸秆能源化利用(秸秆固化成型燃料、秸秆气化燃料、能源作物)。到2015年,规划农村户用沼气总数达到6000万户左右,年生产沼气233亿立方米左右;秸秆固化成型燃料年利用量达到2000万吨左右,建成2000处左右秸秆气化集中供气站,年产秸秆燃气7.3亿立方米。

2007年9月,国家发展和改革委员会公布《可再生能源中长期发展规划》,提出到2010年,我国可再生能源消费量占能源消费总量的比重达到10%,2020年达到15%,形

成以自有知识产权为主的可再生能源技术装备能力,实现有机废弃物的能源化利用,基本消除有机废弃物造成的环境污染。生物质固体成型燃料年利用量达到 5000 万吨,沼气年利用量达到 440 亿立方米,增加非粮原料燃料乙醇年利用量 1000 万吨,生物柴油年利用量达到 200 万吨。

2007 年 10 月,《中华人民共和国节约能源法(修正案)》颁布,指出完善节能基本制度,将市场调节与政府管理有机结合,增强法律的针对性和可操作性,健全节能标准体系和监管制度,加大政策激励力度。

2008 年 3 月,国家发改委发布《可再生能源发展“十一五”规划》,指出发展可再生能源已成为缓解能源供需矛盾、减少环境污染、增加农民收入的重要途径。加快发展水电、生物质能、风电和太阳能,提高可再生能源在能源结构中的比重,是“十一五”时期我国可再生能源发展的首要任务。

2009 年 8 月,《可再生能源法修正案(草案)》审议通过,此次草案的几项重要修改包括:中国的可再生能源发电将全面获得政府财政补贴,可再生能源发电的上网电价管理也将进一步完善。国家设立政府基金性质的可再生能源发展基金,来源为国家财政年度安排专项资金和征收的可再生能源电价附加等。草案还对可再生能源发电全额保障性收购制度进行了细化:要求国家有关部门制定全国可再生能源发电量的年度收购指标和实施计划,确定并公布对电网企业应达到的全额保障性收购可再生能源发电量的最低限额指标,电网企业应该收购不低于最低限额指标的可再生能源并网发电项目的上网电量。

2013 年 11 月,国务院总理李克强在中欧城镇化伙伴关系论坛中提出了新型城镇化的三条基本原则:第一,要以人为核心,注重质量的城镇化;第二,尊重农民意愿,保护农民的合法权益,还要保障粮食安全;第三,集约、低碳、人和自然和谐相处。业界专家普遍认为,上述三项原则也为生物质能的发展带来了契机。

2014 年 6 月 13 日,国家主席习近平在中央财经领导小组第六次会议上强调,立足国内多元供应保安全,大力推进煤炭清洁高效利用,着力发展非煤能源,形成煤、油、气、核、新能源、可再生能源多轮驱动的能源供应体系。

2014 年 11 月,国务院办公厅发布的《能源发展战略行动计划(2014~2020 年)》(以下简称《行动计划》)提出:“到 2020 年,非石化能源占一次能源消费比重将达到 15%,单位 GDP 二氧化碳排放降低 40%~45% 的目标”。为确保这一目标得以实现,《行动计划》还部署了积极发展交通燃油替代,加强先进生物质能技术攻关和示范,重点发展新一代非粮燃料乙醇和生物柴油,以及微藻制油等一系列技术研发和示范项目。同时,《行动计划》中提出的“增强能源自主保障能力”、“推动城乡用能方式变革”也对我国能源革命及农村城镇化的能源供给提供了指导性方案。特别指出着力优化能源结构,大力发展生物质能能源和可再生能源。

## 2.4 我国生物能源政策探讨

近年来,我国在生物质能开发方面取得了迅猛发展,但是我们还是要清醒的认识到,



总体而言无论是技术水平还是政策措施方面都与发达国家存在一定的差距。就政策层面而言还有需要完善的地方，我国政府自上个世纪八十年代起就开展了生物质能源的开发研究工作，尽管在过去的三十多年中取得了一定的成效，但由于技术、资金、意识观念尤其是政府政策方面的不完善导致生物质能源产业的发展相对薄弱，与发达国家相比，存在着不小的差距。为了生物质能源产业的健康发展，以下政策还有待完善。

### 1. 健全市场准入制度，打破行业垄断

生物质能源开发利用的产品多样，包括生物发电、燃气、液体燃料、固体成型燃料，需要进入的市场也是多元化的，建立规范的能源产品市场环境和市场机制十分重要。例如，对于生物液体燃料，目前还不能自由进入燃料销售体系，要研究制定生物液体燃料自由进入石油销售体系的规定和要求，使符合质量要求的生物液体燃料能够自由进入燃料销售体系。

2007年和2010年国家先后出台了生物柴油（BD100）的国家GB/T 20828-2007标准和由生物柴油与石化柴油调配而成的燃料标准（GB/T 25199-2010）。从中央到地方，一系列支持生物柴油产业发展的政策法规相继出台。自2008年起，就有民营企业生产出了合格环保产品。然而，因国营燃油巨头的销售体系拒不接纳民企生物柴油，使得这种价廉物美、节能环保的燃油只能积压在仓库，许多生产企业也面临相似困境。

生物质能源产品尚不具备与传统能源产品相竞争的价格优势，但其具有可再生、大气减排等社会效益，所以，健全和规范的市场准入制度是保证生物质能源产业健康发展的基础和前提。现行的生物质能源产品的市场准入制度有待完善，政策的落实也应该更坚决、更彻底。目前，一些主要的能源销售渠道被传统的大型石化公司把持，它们没有动力发展新能源行业，造成生物能源难以进入加油站进行销售，因此需要以法律化的形式规范和健全各类生物质能源产品的市场准入制度，使生物质能源产品的生产、销售、使用有法可依，为生物能源的发展铺平道路。

### 2. 完善产业服务体系

加快制定完善生物质能技术及产品标准，形成统一、规范、符合我国国情的生物质能技术标准体系；建立完善生物质能产品质量控制和监督体系，形成有效的质量监督机制，提高产品和服务质量；建立健全生物质能信息统计体系，加强生物质能技术指导、工程咨询、信息服务等中介机构的能力建设。

### 3. 完善配套法规和实施细则

完善政策体系，研究制定生物质能综合利用产业政策。各省（区、市）要将生物质能开发利用纳入本地区能源规划，编制生物质能发展规划及实施方案，指导本地区生物质能的开发利用。生物质能源具有多元化的特征，能源产品的开发利用情况各不相同，而现行的法律制度只能对发展生物质能源的措施做出原则性的规定。这就需要各相关部门和地方政府适时出台相应行政法规、技术标准等以细化和补充《可再生能源法》中确定的各项法律制度。进一步完善相应的配套法规和实施细则，形成集基本法和配套准则为一体的生物

质能源法律体系。基本法主要指《中华人民共和国可再生能源法》，是对生物质能源产业发展方面的一个总体概括和规定，也是各项配套准则制定的依据和指导基础。配套准则是指针对具体地区、具体产品、具体项目的具体规定，例如为扩大乙醇汽油的使用而制定的《车用乙醇汽油扩大试点方案》、为鼓励可再生能源发电而制定的《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》等，这些法规有些已经制定并正在实施，有些还在试用阶段，还有些尚未出台，他们都是完整的生物质能源法律体系的组成部分。

#### 4. 促进经济政策法制化

近些年来，我国政府也加大了对生物质能源产业的财政补贴投入。但还存在一些问题：一是要调整投入方式和投入结构，逐步提高具有激励性质的经费投入比例；二是扶持力度还不够，要加大政府对生物质能源企业、农户、研发的投入力度，扩大公共财政覆盖范围。

目前，针对生物能源产业方面的经济政策不够稳定，很难对经济主体起到持续性的激励作用。在完善生物质能法律体系时，应把经济激励措施的相关内容和具体规定写入法律，作为一种强制性的严格标准来执行，通过将经济政策法律化的方式激发投资者的积极性。同时，生物能源目前尚处于产业化起步阶段，还未形成较大的经济规模，其发展瓶颈在于相对较高的生产成本，难以与石化产品相竞争，需要国家提供政策性补贴，以及在财政、信贷、税收和价格等方面的政策支持，从国家层面推动生物能源的发展。

完善国家财税等扶持政策。具体而言，各级政府加大对生物质能开发利用的投入，支持农村生物质能项目建设，着力改善农村生活用能条件。完善支持生物质能利用的财税扶持政策，健全生物质能转化的热力、电力、液体燃料等产品的价格政策。完善金融支持政策，扶持中小型生物质能企业发展。建立健全支持分布式生物质能发电接入电网和并网运行的体制机制，以及生物质油品经营机制，为生物质能产品进入市场创造有利条件。

#### 5. 加大政府采购

政府对可再生能源产品进行采购是扶持生物产业的重要途径，许多国家已将该项政策作为实施可持续发展战略的重要措施。由于政府采购具有集中效应、规模效应和示范效应，保障政府采购制度对于加快生物质能源技术成果推广和应用具有重要意义。可以考虑从两方面着手：一是对于生产生物质能源产品所需要的生产设备、生产技术，实行政府采购，从而整合资源更好地发挥规模优势，提高资金利用效率；二是对于生物质原料采取统一招标的方式，降低下游生产企业的收购成本。积极培育壮大生物质能骨干企业。

#### 6. 完善生物燃料强制使用的机制和措施

完善生物燃料强制使用的机制和措施，扩大生物燃料的市场规模。各级政府要结合各种生物质废弃物综合利用和环境污染治理，制定操作性强的农村秸秆禁烧、城区关停改造燃煤小锅炉的措施。在新能源示范城市和绿色能源示范县建设中，将生物质能利用作为重要选择，形成若干生物质能规模化开发利用的示范区。

#### 7. 加大宣传力度

目前我国还没有形成全社会积极参与支持生物质能源开发的局面。基于可持续发展

观，全社会都在倡导循环经济，人们也往往更多的关注废弃物的利用，进而忽略了生物质能源的开发利用才是更大的循环经济。例如农村的沼气工程，其技术已完全过关，投入少，属于清洁能源，方便生活，经发酵后的有机肥替代化肥，能够节约农业生产成本，好处甚多，但普及率仍然很低，主要原因是缺乏宣传力度，人们的认识不到位。认识不足带来的直接后果是政策支持不力，即便有了政策也很难执行到位。同时，生物质能源属于高新技术产业，前期投入高，不确定因素多，各级政府和企业都有顾虑，生物质能源开发利用工作难以得到充分重视和广泛认可。

开展宣传和培训工作。发展生物质能源具有良好的生态效益和社会效益，我们要充分利用网络、电视、报纸、杂志等多种媒体，采取多种形式，广泛宣传生物质能发电的重要意义。重点抓好技术培训和职业技能鉴定工作，对从事生物质能发电的技术工种实行职业准入和持证上岗制度。

## 8. 加强政府层面的宏观协调和政策导向

作为新兴的能源产业，生物能源涵盖了农业、工业、服务业等不同领域，涉及经济、能源、生物技术、电子、机械等多个学科，是跨部门、跨行业、跨学科交叉型产业，因此需要政府从国家层面上进行统筹发展，促成相关部门进行协同合作。最近几年，我国生物能源产业发展迅速，形成了一定规模，同时出现了资源配置不合理，重复投资建设等一系列问题。生物质能源的管理在国家层面涉及国家能源局、发改委、财政部、科技部等综合管理部门，还涉及农业部、国家林业局、住房和城乡建设部、环境保护部、国家电力监管委员会等具体部门，目前还缺乏一个统一协调的机制。因此，需要制定全国统一的新能源与可再生能源国家行动计划，成立包括政府部门、骨干企业和研究机构在内的工作协调小组，保持畅通的信息交流渠道，在投资和政策等方面统一行动和口径，避免生物能源开发利用工作的盲目、分散及重复。

## 9. 人才队伍建设

我国生物质能源产业发展时间短、基础相对薄弱，除沼气技术基本成熟外，与发达国家相比，技术工艺、相关设备制造相对落后，特别缺乏具有自主知识产权的核心技术。由于技术上存在障碍，使生物质能源发电设备核心原件的本地化制造比例较低，这些因素提高了我国生物质能源成本。

生物质能的发展必须以人才和技术为依托。从常规能源发展的历程来看，我国传统能源都有从引进消化、研究、设计、建设和运行管理的人才培养体系，有力地支持了常规能源建设的快速发展。开展生物质能技术培训，在全国组织开展多种形式多层次的生物质能技术、设备和产品应用培训。对从事生物质能利用的专业技术工种实行职业资格制度，组织各地开展生物质能职业技能鉴定和认证。另一方面，从就业市场来看，相对于国内的火电、燃气发电等大型机组来讲，大部分电力相关专业的毕业生都把眼光瞄准了国华、华润或者地方能源集团的国有发电企业，相比较而言，保障相对较低的大多民营生物质电厂则不在他们的考虑范围内。因此，政府应高度重视我国可再生能源的人才培养和产业体系建设，同时要提高人才待遇和进行政策鼓励，吸引更多专业人员投身于再生能源行业中去。

对科研单位的补贴。发展生物质能源，必须依靠科技进步。必须加强大专院校、科研单位、生产企业的联合，形成一支强大的技术队伍，做好研发、生产、转换、利用工作。其中对生物质技术的研发是根本和基础，因此，政府应加大对研发阶段的财政投入力度，设立专项基金并制定相关的准则，对有重大突破的生物质能源技术研发给予资助和相应额度的奖励。

总之，我国政府在以生物质能源为代表的新能源发展上给予高度重视，并在法律上明确了其在现代能源中的地位，在政策上给予了一定的优惠支持。我国的生物质能源的相关政策，经过不断的修订和完善，已经形成了一定的体系。发展生物质能源和新能源技术是开拓新的经济增长领域，促进我国经济持续健康发展的重要措施。

生物质能源产业的公共属性。作为公共产品或准公共产品的生物质能源产业，其清洁、低污染、可再生利用的特性，符合我国政府所倡导的发展绿色经济的号召；另一方面，生物质能源作为我国能源系统的重要组成部分之一，保障了国家能源安全，也将为我国未来持续的经济增长提供不竭动力。这些特殊的社会属性决定了生物质能源发展过程中我们要把社会效益放在突出位置。我国现阶段，发展生物质能源在注重经济效益的同时，更应重视社会效益。我国的生物质能源起步晚，无论从规模看还是从发展水平看，我们还处于起步阶段，要加快我国生物质能产业的发展步伐，政府的扶持必不可少，这就决定了现阶段的生物质能源产业政策主要是一种倾斜性的、扶持性的政策。

## 参考文献

- [1] 李先德，罗鸣，马晓春等. 世界主要国家生物燃料发展动态与政策法规 [J]. 世界农业，2008，(9)：29-32.
- [2] 莫神星. 全球气候变化下的欧盟低碳能源法律政策 [C]. 2009 年全国环境资源法学研讨会论文集. 2009：516-525.
- [3] 王茜. 发达国家发展低碳经济的经验及启示 [J]. 宁夏社会科学，2011，(3)：51-55.
- [4] 封颖，郑方能. 美国生物能源战略和农业政策对我国未来农业的启示 [C]. 第十二届中国科协年会论文集. 2010：1-5.
- [5] 张永宁，陈磊. 英国发展生物能源的政策及启示 [J]. 化学工业，2007，25(6)：12-15.
- [6] 陈柳钦. 国内外新能源产业发展动态 [J]. 发展研究，2011，(8)：84-89.
- [7] 付佳丽. 废旧水泥混凝土路面再生利用技术的试验研究 [D]. 合肥工业大学，2007.
- [8] 王彬. 和谐社会目标下的诚信体系建设研究 [D]. 长沙理工大学，2008.

第 3 章

生物质能与低碳经济





碳排放是温室气体排放的简称，温室气体中最主要的成份是二氧化碳，因此用碳一词的代表是温室气体。过去半个世纪，世界经济的增长一直是以石化能源为基础，全球初级能源中约 80% 来自石化燃料。从长期来看，发达国家和发展中国家，都面临巨大的能源需求，能源需求的日益增长与能源价格的持续升高，成为环境改善、经济增长的制约因素，迫使国际社会积极探索可持续发展的新能源。从应对气候变化角度而言，使用生物燃料被公认为是降低温室气体排放的有效途径之一。人类活动，特别是石化燃料燃烧排放了大量温室气体。生物燃料在一定程度上可以替代石化燃料，减少温室气体排放所引发的气候变化。

当前，我国能源安全和气候环境受到严重威胁，发展低碳经济迫在眉睫。低碳经济是以低排放、低能耗、低污染为基础，经济效益、社会效益和生态效益相统一的一种新的发展模式。发展低碳经济核心问题是如何解决能源消费的问题，传统能源如石油、煤炭等不可再生资源日益缺乏，严重影响各国能源安全问题。2008 年 7 月国际石油价格飙升至 141 美元 / 桶，引起国内能源市场震荡。石油价格过快上涨，导致国内产生输入型通胀压力<sup>[1]</sup>。

在石化能源渐趋枯竭时，通过改善能源结构、发展可再生能源是我国当前保障能源安全、降低碳排放的重要途径。2015 年中央一号文件中提出，要通过绿色能源改善中国的环境，尤其是农业环境，从而促进中国经济模式的转型，通过能源的多元化保障国家的能源安全。

目前，我国对能源需求强劲，在工业发展、人民消费上都需要大量的能源作为支撑，发展低碳经济应该与能源结构调整相结合、与生物能源开发相结合，在产业结构调整的同时注重新型能源的开发应用，将发展低碳经济的理念融入到我国发展建设中。

### 3.1 我国碳排放概况

我国经济结构还处于转型期，在经济高速发展的同时，一部分粗放型的经济发展模式消耗了大量的资源和能源，导致了我国近年来碳排放量的快速上升。

2014 年，国际学术期刊《自然 - 地球科学》发表文章指出，2013 年全球的二氧化碳排放量再创历史新高，达到 361 亿吨左右。其中，中国排放二氧化碳 100 亿吨，美国 52 亿吨，欧盟 28 国 35 亿吨，印度 24 亿吨。中国碳排放超过欧盟和美国的总和。同时，中国的人均碳排放量以 7.2 吨 / 人首次超过欧盟。我国工业结构中高碳排放产业，如冶金、建筑、石化、火电、交通、化工等能耗高、污染重的产业占比很高。我国的钢铁工业排放的 CO<sub>2</sub> 超过我国所有家庭的排放总和，化工行业使用的能源超过我国道路上所有汽车消耗的能源，炼铝行业使用的电量超过所有商业用电量。我国工业尤其是重工业的快速发展依赖于大量能源和资源的投入，这种高投入、高消耗、高排放的工业模式会影响我国经济的可持续发展<sup>[2]</sup>。



近年来,我国能源消费呈现持续快速增长的态势,从1990年以来,我国的煤炭消费在一次能源中的比重一直维持在70%左右,而低碳能源核电的比重则在2000年以后才有所增加,可再生能源水电的比重也不太高<sup>[2]</sup>。这些导致我国经济发展过程中“高碳”特征非常明显,致使我国的CO<sub>2</sub>排放量增幅过快(见图3-1)。发达国家的碳排放主要存在于消费领域,而发展中国家则主要集中于生产环节。具体而言,发达国家企业与居民的碳排放量之比是3:7,即30%的碳是企业排放的,而70%的碳是居民排放的。对于我国这样的发展中国家来说,情况则相反,即70%的碳是企业排放的。



图3-1 碳排放对环境的污染

国家应对气候变化战略中心副主任柴麒敏曾测算,我国工业部门排放在当前排放总量中约占70%。根据国家统计局工业化水平综合指数和社科院《中国工业化进程报告》数据显示,2010年我国的工业化水平已经达到60%。通常认为,基本完成工业化的水平大约在80%以上,也就是说还有近20个百分点的空间。按目前能源结构,我国工业化水平每增长1个百分点,二氧化碳排放则相应增加约0.6亿吨,意味着我国在2020年基本完成工业化时工业部门还将增加约10亿~12亿吨排放。

城镇化过程是我国未来碳排放的另一个主要增长来源。中国正处于工业经济为主向城镇经济为主转变的阶段,未来城镇化水平还有很大程度的提升空间。我国当前的城镇化速度为每年约1个百分点,每年新增建筑面积近20亿平方米、机动车近2000万辆。城市化水平每增长1个百分点,交通和建筑等部门新增能源需求约8000万吨标煤,二氧化碳排放将相应增加约2亿吨。这意味着除工业部门排放增长之外,我国完成增量城镇化过程还可能至少增加约40亿吨排放。

可见,我国面临着严峻的减排形势,与此同时,我国正在研究政策、措施和方案,“十三五”时期,将对煤的消费总量和二氧化碳的排放量进行总量控制。

## 3.2 我国能源消费结构

《BP世界能源统计年鉴》统计结果显示,2013年我国能源消费约占全球能源消费量的22.4%,石油净进口量达到700万桶/日,能源消费增长占全球能源净增长的49%,超过美国成为全球最大的石油净进口国。

从消费结构来看,2013年煤炭消费比重分别为65.7%,较上年降低0.9个百分点;石油消费比重为18.9%,提高0.1个百分点;天然气消费比重为5.5%,提高0.3个百分

点；非石化能源消费比重为 9.8%，提高 0.4 个百分点。“十二五”期间能源消费增速呈总体放缓趋势，能源消费年均增长 5.51%。而“十五”期间能源消费年均增长为 8.36%，“十一五”期间年均增长为 6.61%。

非石化能源发电逐渐成为电力增量的主体部分。从发电量结构看，2013 年火电、水电发电量分别下降 0.9 和 0.5 个百分点，风电、核电和太阳能等发电方式占比分别增加 0.5、0.1 和 0.8 个百分点，可再生能源的发电量已超过 1 万亿千瓦时。煤炭消费方面，市场仍维持着供大于求状态。煤炭工业加大淘汰落后产能的力度，深入推进煤炭产业兼并重组，进一步提高集中度。此外，《煤炭产业政策》有望修订发布，商品煤质量管理办法和质量标准或将出台，将会限制劣质煤炭、低热值煤炭的长途运输和异地利用。

在油气消费方面，2014 年国内原油产量稳定，原油进口量增幅略高于 2013 年，国内天然气产量超过 1300 亿立方米，同比增长约 12%；进口天然气超过 600 亿立方米，同比增长 20% 以上。在电力消费方面，2014 年增速有所回落，全社会用电量同比增长 7% 左右。核电装机投产 8 台、864 万千瓦；2014 年新增火电装机容量 3500 万千瓦，增速降至 4%。在可再生能源方面，我国已步入全面、快速、规模化发展的重要阶段。2014 年底可再生能源发电装机容量超过 4 亿千瓦。从能源需求方面来看，目前我国的经济社会正处于快速发展时期，城市和农村基础设施建设以及居民消费结构正在升级，形成巨大的能源需求。从能源消费结构方面来看，我国能源的“主动脉”一直呈现的是高碳结构，煤炭消费所占比重过高。由于近年国际石油和天然气价格攀升以及经济快速增长，煤炭在一次能源消费中的比重一直居高不下。以煤炭为主的能源结构会产生较高的排放强度，对环境造成较大的污染，在一定程度上制约了低碳经济的发展。因此，要从产业结构、能源结构的调整入手，逐步转变高碳经济发展模式，大力开发太阳能、风能、核电、生物质能等新兴低碳产业。

2014 年 12 月我国在秘鲁首都利马出席《联合国气候变化框架公约》第 20 轮缔约方会议（COP20），承诺 2016 ~ 2020 年我国将把每年的二氧化碳排放量控制在 100 亿吨以下。在 2020 年之前将单位 GDP 的二氧化碳排放量较 2005 年减少消耗 40% ~ 45%。我国正面临着改善严重大气污染的课题，通过减少化石燃料，并制定应对气候变化的相关法律，以促进产业结构调整，同时对治理大气污染和应对气候变化起到积极效果。

降低煤炭消费，可采用包括政策、技术、市场等多种手段。例如：制定严格的空气质量标准和政策；通过增加补贴，促进替代能源的生产；利用国际能源市场竞争，改变国内能源结构；推动技术进步，提高能效和清洁利用。实际上，我国政府已经从多个层面制定相关的政策约束煤炭消费。我国生产总值能耗在“十二五”期间，实现节约能耗 6.7 亿吨标准煤，二氧化硫排放总量控制在 2086.4 万吨。2013 年 9 月，国务院发布《大气污染防治行动计划》提出控制煤炭消费总量的要求，到 2017 年，煤炭占能源消费总量比重要降低到 65% 以下。京津冀、长三角、珠三角等区域力争实现煤炭消费总量负增长。2014 年 9 月 9 日国务院法制办公布《大气污染防治法修订草案征求意见稿》，再次提出国家将进

行煤炭消费总量控制,优化煤炭使用方式,制定煤炭消费中长期控制目标,减少煤炭在生产、使用、转化过程中的使用。

### 3.3 生物质能与节能减排

就总量而言,生物质能源已经成为世界第四大能源和重要的可再生能源,位于煤炭、石油和天然气之后。生物质能源的特点是资源丰富,可再生、清洁环保、二氧化碳排放低、储存和运输便利,并且与“三农”关系紧密,因此我国发展生物质能源的意义重大。

《中国工程院可再生能源发展战略咨询报告》资料显示,我国生物质能源的资源量是水能的2倍、风能的3.5倍,且分布靠近东部沿海高能耗地区。每年可开发的生物质能源约合12亿吨标准煤,超过全国每年能源总耗量的1/3。因此,在我国发展生物质能源是有效利用各种有机废弃物的理想方式<sup>[3]</sup>。

我国每年秸秆有7亿吨以上,其中田间焚烧约1.5亿吨。每当作物收获季节,焚烧秸秆造成资源浪费、空气污染,严重时甚至影响高速公路通行及飞机起降。一个装机3万千瓦的秸秆直燃发电厂,就可以消纳中等规模县域内的全部秸秆,还可以实现为农民增收5000万元;而二氧化碳排放量仅为同等规模燃煤发电的百分之一,可减碳排放10万吨<sup>[3]</sup>。

我国每年中小燃煤锅炉消耗燃煤约7亿吨,占全国总能源消耗的比例不到20%,却排放了50%的SO<sub>2</sub>,是形成酸雨的罪魁祸首。利用林业剩余物、秸秆、城市绿化修剪废弃物等生产固体颗粒,可替代煤炭和石油烧锅炉供暖,SO<sub>2</sub>排放量降低95%,CO<sub>2</sub>排放量降低99%,且具有良好的经济前景。

以生物成型燃料减排为例,使用生物质成型燃料可有效的帮助企业达到节能减排的目的,成型燃料采用农林剩余物木屑、木糠等加工而成,原料来源丰富,且燃料热值高,是替代煤炭的最佳燃料产品之一;煤炭的SO<sub>2</sub>(二氧化硫)排放为14.2,生物质颗粒的SO<sub>2</sub>(二氧化硫)排放几乎为零,减少我国98%的SO<sub>2</sub>排放;煤炭的NO<sub>x</sub>(氮氧化物)排放为4.3,生物质颗粒燃料的NO<sub>x</sub>(氮氧化物)的排放为0.47,降低NO<sub>x</sub>(氮氧化物)排放达90%以上。

生物质发电是利用农作物秸秆、果树枝、林业加工废弃物、城市和工业有机废弃物、禽畜粪便等燃烧发电的技术。坐落在山东省菏泽市单县的生物质发电工程是我国生物质发电产业的一面旗帜。它是中国第一个建成投产的农林生物质发电项目,也是首家国家级生物质发电示范项目。该项目的生物质发电机组装机容量为2.5万千瓦,技术从丹麦BWE公司引进,2006年12月1日当其正式投产发电时,中国生物质发电实现了“从无到有的重大突破”。该电厂所需燃料以破碎后的棉花秸秆为主,可掺烧部分树枝、桑条、果枝等林业废弃物。每年可消耗农林废弃物15~20万吨,发电量约1.6亿千瓦时。单纯在秸秆等原料收购这一方面,每年可为当地农民及企业带来直接收入近4000万元。与同类型火

电机组相比，运营这样一台容量为 2.5 万千瓦的生物质发电机组，每年可减少排放二氧化碳约 10 万吨、二氧化硫 870 吨，每年燃烧后产生的约 8000 吨灰粉，可作为高品质的钾肥直接还田<sup>[4]</sup>。

“生物质能源不仅能够创造经济效益，有助于减排二氧化碳，缓解能源危机；还有助于我国应对气候变化、解决环境问题。”“十二五”期间国家在发展战略布局、资源培育、产业结构调整中更加重视生物质能源发展，同时给予了大量政策支持，我国生物质能源的发展潜力进一步扩大。生物质能源将有助于我国发展循环经济、建设生态文明，在实现可持续发展等方面有着不可替代的作用<sup>[5]</sup>。

### 3.4 低碳经济

所谓低碳经济，是指通过技术创新、产业转型、制度创新等多种手段。尽可能地减少煤炭石油等高碳能源消耗，进而减少二氧化碳等温室气体的排放，以达到经济社会发展与生态环境保护双赢的一种经济发展形态。

美国能源部预计，到 2017 年，全球生物燃料市场规模将达 811 亿美元。生物燃料作为接近零排放的绿色能源，在高碳税和能源需求不断攀升的推动下，能源龙头纷纷进军生物燃料领域。据国际航空运输协会的最新预测，2020 年时生物航煤将达到航油总量的 30%。未来十年，全球道路运输方面对生物燃料的需求将增长六成。为了减少碳排放和提高能源自给率，国际能源巨头纷纷聚焦生物燃料研究。再看国内，政府和企业逐步加大生物能源扶持力度。国内中石化在生物航煤、生物柴油等生物质燃料的研发力度也开始加大。2013 年 4 月 24 日中国首家自主研发生产的生物航煤用于商业客机的首次试飞取得成功，成为继美国、法国、芬兰之后第四个拥有生物航煤自主研发生产技术的国家。这些表明，减排标准的提高和能源消耗的增长，客观推动了生物能源发展<sup>[6]</sup>。

此外，为推动低碳经济的发展战略、落实节能减排工作的相关要求，发挥金融在低碳

产业发展中的积极作用，我国建立了碳排放交易市场（见图 3-2），出台一系列碳金融业务实施方案，帮助企业盘活碳配额资产、调整产业结构升级，最终达到节能减排的目的。所谓碳排放权是指依法取得的向大气排放温室气体的权利。碳排放权质押贷款则是将碳配额作为质押品来进行融资，碳排放交易即把二氧化碳排放权作为一种商品，从而形成了二氧化碳排放



图 3-2 碳排放交易

权的交易，简称碳交易。从项目类型来看，用于碳排放交易市场的项目类型主要包括可再生能源和新能源项目。生物质发电、农村户用沼气、风力发电、太阳能发电、垃圾焚烧发



电项目；清洁交通减排项目；海洋固碳减排项目；林业碳汇项目；农业减排项目这五大类项目都涉及生物能源产业。

2011年10月，国家发改委为落实“十二五”规划关于逐步建立国内碳排放权交易市场的要求，同意北京市、天津市、上海市、重庆市、湖北省、广东省及深圳市开展碳排放权交易试点。2014年12月，国家发改委颁布了《碳排放权交易管理暂行办法》，具体解释和规定了配额管理、排放交易、核查与配额清缴、监督管理、法律责任等内容。在节能减排的大趋势之下，多地在碳排放交易方面正在稳步推进。根据规划，我国将在2016年启动全国统一碳交易市场，2019年以后碳交易市场将承担温室气体减排核心的作用。预计到2020年，每年碳排放许可市场价值将达到600～4000亿元。

根据北京环境交易所公布的数据，2015年12月31日，北京市碳排放配额线上成交量49442吨，成交额229.35万元，成交均价46.39元/吨；协议转让成交量6万吨，累计成交量430.04万吨，成交额突破2亿元。截至2015年5月8日，上海碳市场配额成交总量已实现311.54万吨，成交金额1.08亿元，其中，2015年实现的成交量已超过100万吨。

2015年8月25日，我国最大单笔碳排放权质押贷款的签署，中国进出口银行湖北省分行与湖北宜化集团有限责任公司签署了国内单笔金额最大碳排放权质押贷款协议。根据协议，中国进出口银行将为湖北宜化化工股份有限公司发放贷款1亿元人民币，该笔贷款首开政策性银行碳排放权质押贷款先河、系国内碳排放权质押贷款单笔最大金额，也是在碳金融领域的一次创新尝试。中国进出口银行通过向企业提供优质的金融服务，为企业节能减排提供更多的资金支持，增强碳市场的活跃度和流动性，为节能减排工作和“两型社会”建设做出了贡献。

### 3.5 生物质能与能源结构调整

2013年我国能源供需形势总体略显宽松，能源消费增速与上一年度相比基本持平。其中煤炭略有增长，石油平稳增长，天然气快速增长，非石化能源大幅增长。

2013年我国原煤产量约37亿吨，较上年相比增加约5000万吨，同比增长为1.4%，增速同比回落2.4个百分点。国内原油产量约2.1亿吨，同比增加370万吨，增长了1.8%。天然气产量1175亿立方米，同比增长10.1%，增速较上一年提高5.7个百分点。2013年全国发电量5.32万亿千瓦时，同比增长约7.5%。其中水力发电量8700亿千瓦时，同比增长1.7%；火力发电量4.2万亿千瓦时，同比增长6.9%；核电发电量1100亿千瓦时，同比增长11.9%；风力发电量1340亿千瓦时，同比增长30.1%；太阳能发电量70亿千瓦时，同比增长约1倍；生物质发电量420亿千瓦时。从生产结构来看，2013年原煤生产比重76.1%，较上一年降低0.4个百分点；原油生产比重8.7%，下降0.2个百分点；天然气生产比重4.2%，下降0.1个百分点；非石化能源生产比重10.9%，提高0.6个百分点。

生物能源的比重在能源结构中呈现逐年上升趋势，以生物质能发电为例，水电水利规划设计总院和国家可再生能源信息管理中心发布的《2013 中国生物质发电建设统计报告》显示，截至 2013 年底，除青海省、宁夏回族自治区、西藏自治区以外，全国已经有 28 个省（市、自治区）开发了生物质能发电项目。全国累计核准容量达到 12226.21 兆瓦，其中并网容量 7790.01 兆瓦，占核准容量的 63.72%。江苏省、山东省生物质能发电累计核准容量分别为 1395 兆瓦、1376 兆瓦，分别占全国累计核准容量的 11.42%、11.27%，居全国前两位。浙江省 2013 年新增核准容量为 547.3 兆瓦，占全国新增核准容量的 15.89%，是全国新增核准容量最多的省份。从地区看，生物质能发电装机主要集中在华东地区，并网容量达 3514.84 兆瓦，占全国总装机容量的 45.12%，居全国首位。

2013 年，全国生物质能发电年等效满负荷运行小时数约为 5844 小时。其中，江西省生物质能发电厂年等效满负荷运行小时数约 7626 小时，为全国最高。北京、上海 2013 年生物质能发电年等效满负荷运行小时数也较高，分别为 7087 小时、6948 小时。从生物



图 3-3 秸秆发电厂

质能发电技术类型看，农林生物质直接燃烧发电总并网容量为 4195.3 兆瓦（见图 3-3），占比 53.85%；垃圾焚烧发电总并网容量 3400.29 兆瓦，占比 43.65%；沼气发电并网容量 194.42 兆瓦，占比 2.5%。

目前，国能生物质发电有限公司和中国节能投资公司以及五大发电集团、上海城投、凯迪电力、光大国际、广东粤电等诸多具备行业基础和资金、技术优势的企业都在参与生物

质能发电项目开发建设。截至 2013 年底，我国生物质能发电项目的建设投资主体中，国有企业并网容量达 2782 兆瓦、民营企业为 4116 兆瓦、外资企业为 491 兆瓦、中外合资企业为 401 兆瓦。从产业整体状况分析，生物质能发电及生物质燃料目前仍处在政策引导扶持期。“生物质能发电行业的标杆企业在技术、成本方面已经具有明显优势，已投产生物质能发电项目的盈利能力得到初步验证，直燃生物质开发利用已经初步产业化。

### 3.6 生物质能发展面临的挑战

由于生物质能产业发展还处于起步阶段，我们主要面临的是原料收集难、技术门槛和资金门槛高的问题。

#### 1. 原料供给不稳定

收购难、储存难是制约生物质发展的关键因素。以液体燃料生物柴油为例，仅仅以地沟油、麻疯树油为原料进行生物柴油的生产，远远不能满足市场需求，与普通柴油相比环保节能、污染小、有害气体少，符合国内当下低碳经济发展的主题。生物质燃料来源不稳定是制约生物质燃料规模化发展的最重要因素。我国燃料乙醇主要以玉米作为原料，“与



粮争地”、“与人争粮”一直以来都是困扰生物质能推广应用的关键难点，生物质燃料的生产需要大量的原料做支撑。

作为一门新兴产业，生物柴油企业发展遇到最大的难题在于原材料短缺。如果不能解决掉这一瓶颈，单靠免除消费税，生物柴油行业也很难持续健康发展。我国对生物柴油发展高度重视，但近年该产业的进展停滞不前，造成这种局面的主要原因在于原料来源不稳定。原料供应不稳定主要是由于产量低和收购难造成的。



图 3-4 秸秆储存车间

秸秆可作为固体成型燃料（见图 3-4）、燃料乙醇的原料，与欧洲农业以大农场为主有很大不同，我国的国情是人均土地少，因此决定了人均产出秸秆并不多，而且高度分散，部分秸秆还用于饲料、还田和造纸行业，农民多年来都是把秸秆作为生活燃料的主要来源，并且农作物秸秆的收购往往在农村大忙季节，收集秸秆的力量不足。秸秆收购具有很强的季节性，要维持企业的正常运转，必须有一定储存量；因秸秆比重轻，体积大，还需一系列的防雨、防潮、防火等配套设备，投资建设和维护费用大，提升了生产成本。

原材料因素严重制约着生物柴油、燃料乙醇等行业的发展是众多企业的共识。由于我国各地农林业分布不平衡，如何保障持续充足的原料供应，还需要政府从宏观上进行协调。

## 2. 技术门槛高

生物能源行业既属于劳动密集型行业也是知识密集型行业，生产运行要求较高的技术门槛，我国仍处于生物质能产业发展初期，缺乏具有自主知识产权的核心技术，这使得我国生物质能产业在基础技术研究、新产品研发和应用技术创新等方面存在成本高、产品单一等问题。以纤维素乙醇为例，纤维素是替代粮食生产燃料乙醇的重要原料，在生产过程中需要首先将纤维素降解为葡萄糖，这个过程需要纤维素酶，而进口的纤维素酶价格昂贵，提高了纤维素的生产成本；以生产生物航空燃料为例，加氢催化技术是将植物油转化为高品质航空煤油的重要途径，在生产过程加氢催化剂是整个生产的关键，相关的催化剂、配套装置为 UOP 等少数外资石油公司所掌握，需要支付较高的费用进行购买。

## 3. 资金门槛高

较常规能源而言，生物质能在发展初期成本高、利润薄，需要政府大力扶持，以生物质发电为例，中、小型生物质发电项目的投资大都在几千万元、上亿元左右，这样的资金规模对目前大部分中小企业来说压力相当大，尤其是生物质发电技术多应用于农村地区，对于当地的企业而言是沉重的资金负担，难以承受<sup>[7]</sup>。尽管政府部门制定了一些与低碳技术研发有关的优惠政策，由于政策规定不完善的原因，一些鼓励政策不能够有效落实。在发展初期，低碳技术项目特别是大规模的示范项目的投资主要是依靠政府临时拨款和政策贷款，还没有形成稳定的政府投入机制。同时，金融系统对低碳技术项目支持不够，融资

难度大,致使低碳产业发展受限。

总之,生物质能的发展前景广阔,在国家的倡导下,节能环保的低碳产业也雨后春笋般萌发、成长,绿色出行、垃圾分类等生活习惯也融入到居民日常生活之中。以重庆市的垃圾处理为例,市民积极配合政府启动生活垃圾分类工作,垃圾分类后送到垃圾厂处理,垃圾场则将餐厨垃圾变废为宝进行生物能源的生产。重庆环卫控股的黑石子餐厨垃圾处理厂建于2009年,主要负责对主城区营业餐饮企业、学校、事业单位、政府部门的餐厨垃圾进行集中回收和处理。该厂成立后,自主创新“厌氧消化、热电联产”工艺技术,将餐厨垃圾进行油水分离,“撇水油”经过酯化和酯交换,加工成生物柴油;“撇水”经厌氧消化后产生沼气,沼气经过净化处理后发电<sup>[8]</sup>。

黑石子垃圾厂日处理餐厨垃圾1000吨(见图3-5),产生18吨生物柴油和5万千瓦时的电,达全国同类垃圾厂之最。这些餐厨垃圾经过处理后,产生的电全部并入国家电网,生物柴油则以每吨7000多元的价格出口到韩国。为了提高处理能力,黑石子垃圾厂开始启动扩建工程,扩建工程建成投产后,黑石子垃圾厂餐厨垃圾日均处理能力将提高

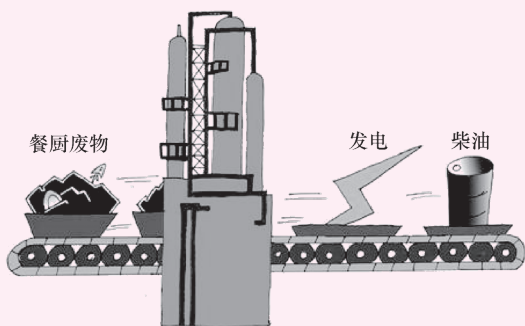


图 3-5 利用餐厨垃圾生产再生能源

到2000吨,年产沼气2800万立方米,发电3300万千瓦时,生产8000吨生物柴油。黑石子垃圾厂还计划将生产过程中产生的其他可燃气体加以利用,预计每年生产天然液化气798万立方米,生产有机肥料2.4万吨,年减排二氧化碳22万吨,实现更为高效的餐厨垃圾资源化利用。

虽然我国目前生物能源领域还处于发展阶段,部分关键设备、技术还需引进、消化吸收,但是我国发展后劲十足,在不少领域正追赶甚至超越西方先进技术。此外,我国农林生产的生物量相当于15亿吨标准煤,这是我国发展生物质产业永不匮乏的资源。随着我国能源技术的发展、工业结构的升级,碳排放的问题也将迎刃而解。

## 参考文献

- [1] 刘志雄,何晓岚.低碳经济背景下我国生物质能发展分析及比较[J].生态经济,2012,(1): 117-121.
- [2] 石红莲.降低我国碳排放量的对策探析[J].理论月刊,2010,(7): 97-99.
- [3] 巩海永.碱-离子液体【BMIM】C1预处理对麦草酶水解糖化的影响研究[D].西安:陕西科技大学,2011.
- [4] 田景武.生物质发电厂项目建设的关键问题研究:以KM厂为例[D].华北电力大学(北京),2012.
- [5] 武瑞娟.基于循环经济的生物质能利用模式研究[D].郑州:河南农业大学,2011.
- [6] 刘重才.美国能源巨头布局绿色能源领域生物燃料行业迎扩容机遇[J].能源研究与利用,2014,(3): 27-27.
- [7] 郝德海.生物质发电技术产业化研究[D].济南:山东大学,2006.
- [8] 吉喆,尹海琼,王海蕴等.巴蜀风向标[J].财经界,2014,(16): 39-47.

第 4 章

生物质资源



生物质发电、燃气、生物质成型燃料和生物液体燃料是我国今后生物能源发展的重点方向。预计到 2020 年, 生物质发电总装机容量将达到 3000 万千瓦, 生物质固体成型燃料年利用量将达到 5000 万吨, 沼气年产量将达到 440 亿立方米, 生物燃料乙醇年产量将达到 1000 万吨, 生物柴油年产量将达到 200 万吨。发展生物质能, 原料的保障是关键, 充分利用农业生物质资源, 大力发展林木生物质资源, 有效利用生活废弃物, 不仅可以为生物能源的发展提供原料保障, 还可以减少环境的污染, 有利于改善严峻的生态环境。

## 4.1 生物质资源的组成

生物质主要由糖、蛋白质、脂类、木质纤维素(甘油三酯)组成。树木主要由纤维素、半纤维素、木质素组成。谷物含淀粉较多, 油料作物含油脂较多, 污泥和畜禽粪便则含有较多的蛋白质和脂质。显然不同种类的生物质, 其成分差异很大, 在生物能源的生产过程中要依据生物质组分的不同, 来选择适宜的能源转化方法。

### 1. 糖类(单糖和低聚糖)

糖类, 是多羟基醛或多羟基酮及其缩聚物的总称, 由碳、氢与氧三种元素所组成。单糖由于无法水解成为更小的碳水化合物, 因此是最小的糖分子。绝大多数细菌都能利用糖类作为碳源, 但是它们在分解糖类物质的能力上存在很大差异。天然葡萄糖, 无论是游离态或是结合态, 均属 D 构型, 在水溶液中主要以吡喃式构形含氧环存在。低聚糖又称寡糖, 由 2 ~ 10 个单糖分子脱水缩合而成。发酵常用的低聚糖多为双糖, 常见双糖有蔗糖和麦芽糖, 其中蔗糖, 广泛存在于植物的根、茎、叶、花、果实和种子中, 尤以甘蔗和甜菜中含量最高。蔗糖分子由一个葡萄糖分子和一个果糖分子缩合而成; 麦芽糖, 又称饴糖, 甜度约为蔗糖的一半。麦芽糖分子由两个葡萄糖分子脱水缩合而成。

### 2. 淀粉

淀粉是葡萄糖的高聚体, 通式是  $(C_6H_{12}O_6)_n$ , 水解到二糖麦芽糖, 化学式是  $C_{12}H_{22}O_{11}$ , 完全水解后得到葡萄糖。淀粉分为直链淀粉和支链淀粉两大类, 直链淀粉含数百个葡萄糖单元, 支链淀粉含上千个葡萄糖单元。淀粉是燃料乙醇生产的重要原料。淀粉属于多糖, 是由单糖单元通过糖苷键组成的长链分子, 它是碳水化合物在细胞中储藏的主要形式。淀粉是绿色植物光合作用的产物, 植物生长期间以淀粉粒形式储存于细胞中, 它主要分布在种子、块茎和块根等器官中。

### 3. 木质纤维素类

木质纤维素是自然界最为丰富的一类生物质, 它是植物细胞壁的主要结构成分, 占植物类生物质总量的 33% ~ 50%, 从化学成分来看, 木质纤维素主要由纤维素、半纤维素和木质素组成。木质纤维素既可以作为微生物发酵原料用于燃料乙醇、生物氢能源的生产, 也可以直接作为底物, 通过生物质液化、气化等途径转化为液体或气体燃料。

### (1) 纤维素

纤维素是由葡萄糖组成的大分子多糖（见图 4-1），纤维素类生物质的产量高。在化学性质方面，纤维素是无色无味的白色丝状物，不溶于水、稀酸、稀碱和有机溶剂。纤维素需要降解以后才能进行利用，纤维素降解技术是纤维素利用的关键，常通过酸碱、微生物等途径进行降解。



图 4-1 纤维素

### (2) 半纤维素

半纤维素主要由木糖、阿拉伯糖、半乳糖等五碳糖和六碳糖构成，半纤维素广泛存在于植物中，针叶材含 15% ~ 20%，阔叶材和禾本科草类含 15% ~ 35%。

### (3) 木质素

木质素广泛存在于较高等的维管束植物（裸子植物、被子植物）中，特别在木本植物中，木质素是木质部细胞壁的主要成分。木质素在酸中十分稳定，分离后的木质素为无定形的褐色物质，它在碱和氧化剂中的稳定性比纤维素稍差，木质素能溶于亚硫酸和硫酸中，据此可以将木质素和其他成分分开。



图 4-2 微藻油

## 4. 脂类

天然油脂由甘油三酯和少量游离脂肪酸组成，其中以正构、含偶数碳原子的脂肪酸为主，常见的有肉豆蔻酸（ $C_{14}$ ）、软脂酸（ $C_{16}$ ）、硬脂酸（ $C_{18}$ ）等饱和酸和棕榈油酸（ $C_{16}$ ，单烯）、油酸（ $C_{18}$ ，单烯）、亚油酸（ $C_{18}$ ，二烯）、亚麻酸（ $C_{18}$ ，三烯）等不饱和酸，主要用于生物柴油、航空柴油的生产（见图 4-2）。

## 4.2 生物质资源的分布

生物质能以生物质为载体，直接或间接地来源于绿色植物的光合作用。根据收集来源的不同，生物质资源可分为农业资源、林业资源、生活污水和工业有机废水、固体废物、畜禽粪便五大类，其中农业、林业资源是生物质资源最主要来源。

### 4.2.1 农业生物质资源

农业生物质资源包括能源农作物、农产品加工副产品两类，能源农作物包括糖质作物、淀粉作物和油脂作物。目前我国可转换为能源用途的作物有 200 多种，其中适宜开发燃料乙醇的农作物主要为糖质作物和淀粉作物，包括有甘蔗、甜高粱、木薯、甘薯等，生



产生物柴油的农作物主要为油脂作物，如油菜等。《中共中央国务院关于积极发展现代农业扎实推进社会主义新农村建设的若干意见》提出，“以生物能源、生物基产品和生物质原料为主要内容的生物质产业，是拓展农业功能、促进资源利用的朝阳产业”，“启动农作物秸秆固化成型燃料试点项目”，“鼓励有条件的地方利用荒山、荒地等资源，发展生物质原料作物种植”，农业生物质资源开发潜力巨大。

### 1. 糖质作物

甘蔗，禾本科甘蔗属，属于为多年生热带和亚热带草本作物，可用于制糖以及生产燃料乙醇。统计数据显示，我国 90% 以上的甘蔗产量来自南部四个省区，即广西、云南、广东、海南。其中，占比最多的是广西，约为全国产量的 60%，其次是云南，约占全国产量的 16%。2014 年我国甘蔗产量达到 12225 吨。

甜高粱，禾本科高粱属粒用高粱的变种，源于非洲。甜高粱的用途十分广泛，甜高粱具有耐干旱、耐水涝、抗盐碱等多重抗逆性，茎秆汁液含糖量在 16% ~ 20% 左右，每 16 ~ 18 吨茎秆可生产 1 吨燃料乙醇。目前我国种植规模不大种植比较分散，北京、天津、河北、内蒙古、河南、山东、辽宁、吉林、黑龙江、陕西、新疆等省份都有种植。甜高粱在《可再生能源发展“十一五”规划》中，被列为生物液体燃料的重要生产原料之一。

甜菜，又名蒺菜，二年生草本植物，原产于欧洲西部和南部沿海。当今世界甜菜种植面积约占糖料作物的 48%，次于甘蔗而居第 2 位，我国大面积引种糖用甜菜始于 1906 年。主产区在北纬 40° 以北，包括东北、华北、西北三个产区，其中东北种植最多，约占全国甜菜总面积的 65%。甜菜的块根水分占 75%，固形物中蔗糖占 16% ~ 18%，可用于燃料乙醇发酵。

### 2. 淀粉类作物

木薯，又称南洋薯、木番薯、树薯，是大戟科植物的块根。主要分布于热带地区。木薯的产量跟地区和品种有关，平均产量大约在 2 吨 / 亩左右，木薯是制淀粉的主要原料之一。木薯具有易栽、耐旱、耐涝、高产等特点，适合在热带、亚热带地区种植，主要分布在广西、广东、海南、福建、云南、湖南、四川、贵州、江西等九省（区）。中国于 19 世纪 20 年代引种栽培，现已广泛分布于华南地区，广东和广西的栽培面积最大，福建和台湾次之，云南、贵州、四川、湖南、江西等省亦有少量栽培。鲜木薯的淀粉含量约 30% ~ 35%，7 吨鲜木薯可生产 1 吨燃料乙醇。

甘薯，又名山芋、红芋、番薯、甜薯，薯蓣科薯蓣属缠绕草质藤本，属喜光的短日照作物，性喜温，不耐寒，较耐旱。甘薯具有耐旱、抗风、病虫害少等特性，且能适应贫瘠土地。我国甘薯栽培已有 400 多年的历史，是世界上最大的甘薯生产国，常年甘薯种植面积为 7500 ~ 8000 万亩，占我国耕地总面积的 4.2%。甘薯在中国分布很广，以淮海平原、长江流域和东南沿海均有种植，种植面积较大地区包括四川、广东、山东、河南、重庆、安徽等省区。甘薯产量较高，最高亩产可达 5000 千克，此外甘薯淀粉产量高，是生产燃料乙醇的理想原料，作为新型能源植物已经引起许多国家的高度重视。鲜甘薯淀粉含量在

18% ~ 30% 之间, 8 吨甘薯可生产 1 吨燃料乙醇。

### 3. 油脂类作物

油菜, 又叫油白菜, 苦菜, 十字花科、芸薹属植物, 油菜是主要油料作物之一, 适应范围广, 发展潜力大。我国长江流域、黄淮地区、西北和东北地区都适宜油菜生长, 适宜的栽培面积在 15 亿亩以上。我国是油菜的起源地之一, 种植油菜的历史已有几千年。2014 年我国油菜籽种植面积约 1.1 亿亩, 年产量约 1460 万吨。长江流域是我国的油菜集中产区, 油菜播种面积、总产量均占全国的 80% 以上, 占全世界油菜播种面积、总产量的 1/4 以上, 是世界上四大油菜栽培区中面积最大、产量最多的产区。湖北为油菜产量最高省份, 油菜种植面积为 1253 万亩左右, 产量达 159.97 万吨, 产量超过 100 万吨的有安徽、四川、江苏、湖南。油菜亩产菜籽 120 公斤, 平均产油率 30%。

此外, 我国作为世界最大的棉花生产国, 全国棉花播种面积 6328.6 万亩, 棉籽产量 980 ~ 1300 万吨, 可产棉籽油 180 ~ 200 万吨左右, 由于近年来我国豆油产量迅猛增长, 棉籽油消费量萎缩, 大量的棉籽没有充分利用, 为生物柴油提供了原料来源。

### 4. 农产品加工业副产品

农产品加工业副产品主要包括稻壳、玉米芯、甘蔗渣、秸秆等, 它们主要成分为木质纤维素, 可进行固体成型燃料的生产, 也可用于燃料乙醇、生物燃气的开发, 农产品加工业副产品主要源于粮食加工、制糖、酿酒等行业, 具有数量巨大, 产地相对集中, 易于收集处理的特点。其中, 稻壳占稻谷重量的 20%, 是稻谷加工的主要剩余物之一, 主要产于东北地区和湖南、四川、江苏、湖北等省; 玉米芯约占穗重的 20%, 是玉米穗脱粒后的穗轴, 主要产于东北地区和河北、河南、山东、四川等省; 甘蔗渣是蔗糖加工业的主要副产品, 主要产于广东、广西、福建、云南、四川等省区。

农作物秸秆是一种重要的农产品加工业副产品, 它是成熟农作物茎叶(穗)部分的总称。通常指小麦、水稻、玉米、薯类、油菜、棉花、甘蔗和其他农作物(通常为粗粮)在收获籽实后的剩余部分。特点是粗纤维含量高(30% ~ 40%), 并含有木质素等, 可用于燃料乙醇、生物质燃气的生产。我国秸秆主要分布在河北、辽宁、内蒙古、吉林、河南、黑龙江、江苏、山东、湖北、湖南、安徽、江西、云南、四川等粮食主产区, 单位国土面积秸秆资源量高的省份依次为山东、河南、江苏、安徽、河北、上海、吉林、湖北等。2014 年, 全国主要粮食作物产量约为 6.07 亿吨, 秸秆产量约 6 ~ 8 亿吨, 除用于肥料、饲料、基料以及造纸等工业原料外, 约有 3.2 亿吨农作物秸秆可作为能源使用, 折合 1.5 ~ 1.8 亿吨标准煤。以“十一五”期间的发展速度推算, 到 2015 年我国主要农作物秸秆产量将达到 9 亿吨, 其中约一半可作为农业生物质能的原料。

#### 4.2.2 林木生物质资源

当前, 我国林地面积约 3 亿公顷, 森林面积约 2 亿公顷, 森林蓄积(指一定森林面积上存在着的林木树干部分的总材积) 150 亿立方米, 人工林保存面积 0.7 亿公顷, 蓄积

19.6 亿立方米，林木生物质资源潜力约 180 亿吨。现有林木资源中可作为能源利用的主要是木质能源林、油料能源林和淀粉能源林三类。

### 1. 木质资源

木质资源主要是薪炭林，所谓薪炭林是指以生产薪炭材和提供燃料为主要目的的森林（或林分），可用于纤维素乙醇、生物燃气的生产以及生物质发电。我国现有薪炭林集中分布于云南、陕西、辽宁、湖北、贵川等 15 个省区，占全国薪炭林面积和蓄积量的 97%。年森林采伐量约为 2.5 亿立方米，可产生采伐、造材剩余物 1.1 亿吨；现有灌木林地总面积 5300 多万公顷，每年可采集灌木木质燃料 1 亿吨左右；全国大约有 7000 多万公顷的中幼龄林，每年可获取 0.2 ~ 0.4 亿吨原料；另外，经济林修剪、城市绿化修枝也能提供一些原料。我国现有林木资源用作木质能源的潜力约 3.5 亿吨，若全部开发利用则可替代 2 亿吨标准煤。

### 2. 油料能源林

油料能源林可用于生物柴油、生物航空煤油的生产。我国已查明的油料植物有 151 科 697 属 1554 种，种子含油量 40% 以上的植物有 150 多种，能够规模化培育的乔灌木树种有 30 多种，包括小桐子、文冠果、无患子、油棕、光皮树、黄连木、山桐子、乌桕、山苍子、欧李、盐肤木、东京野茉莉等 12 个树种，其中油棕、无患子等 9 个树种相对成片分布面积超过 100 万公顷，年果实产量 100 万吨以上，全部加工利用可获得 40 余万吨生物燃油。

小桐子，大戟科麻风树属落叶灌木或小乔木，又名麻风树、膏桐、小油桐、油芦子等（见图 4-3）。小桐子是目前已知生长较快的油料树种之一，3 年可挂果投产，5 年就进入盛果期。果实采摘期长达 50 年，籽粒的含油率为 40% ~ 70%，产量可达 300 ~ 800kg/ 亩。因籽粒含油率高，被生物质能源研究专家称之为“黄金树”、“柴油树”。我国小桐子种植重点布局在四川、云南、广西、贵州 4 省区，重点区域为南方地区的金沙江流域、澜沧江流域、红河流域和南盘江流域 4 个区域；规划种植规模为 145 万公顷，其中新造 141 万公顷、改培 4 万公顷。



图 4-3 (a) 麻风树



图 4-3 (b) 麻风树籽

文冠果，无患子科文冠果属，落叶小乔木，别名温旦革子、文官果、土木瓜（见图4-4）。我国特有的优良木本油料树种，有“北方油茶”之称，文冠果种子含油量为35%~40%。我国文冠果种植的布局重点在河北、内蒙、山西、辽宁、陕西、青海、甘肃、新疆、河南、吉林、黑龙江11个省区，重点区域为坝上高原、科尔沁山地、吕梁山地、陕西洛河流域、湟水河流域等5个地区；国家规划种植规模为98万公顷，其中新造94万公顷、改培4万公顷。



图4-4 (a) 文冠果



图4-4 (b) 文冠果籽

无患子，无患子科无患子属，别名木患子（本草纲目）、油罗树、洗手果（见图4-5）。无患子种仁含油量高，用来提取油脂，制造天然滑润油；我国无患子种植重点布局在广西、重庆、贵州、江西、福建、浙江、安徽、陕西、湖北、湖南和广东11个省区，其中南方地区的桂西南、四川盆地东南部、闽北、赣东、浙中丘陵盆地、皖西南区、大巴山区和粤北山地为重点培育区域；国家规划种植规模为25万公顷，全部为新造。

乌桕，大戟科乌桕属落叶乔木，别名腊子树、柏子树、木子树、乌桕、秦子树、柏树、木蜡树、木油树、木梓树（见图4-6）。乌桕是一种色叶树种，春秋季叶色红艳夺目，不下丹枫，为中国特有的经济树种，已有1400多年的栽培历史。乌桕籽的含油率高达40%，是生产生物柴油的优质原料，在贵州、浙江、湖北、四川、江西和安徽等省分布较多。



图4-5 无患子



图4-6 乌桕

光皮树（见图4-7），山茱萸科多年生落叶乔木，是具有重要经济价值的油料树种。其果实含油率33%~36%，广泛分布于黄河以南地区，集中分布于长江流域至西南各地的石灰岩区，具有耐贫瘠、抗干旱的特点。我国光皮树种植重点布局在湖南、湖北和江西3



省，建设光皮树能源林的重点区域为南方地区的鄂西湘北和湘东赣西区；国家规划种植规模为 63 万公顷，全部为新造。

油棕树（见图 4-8），油棕属多年生单子叶植物，是热带木本油料作物。油棕的果肉、果仁含油丰富，在各种油料作物中，有“世界油王”之称。油棕果含油量高达 50% 以上，主要生产棕榈油。棕榈油是世界油脂市场的一个重要组成部分，它在全世界油脂总产量中的比例超过 30%。我国油棕种植重点布局在海南、广西、广东、云南 4 省区，重点培育区域为北部湾沿岸滇南山区；国家规划种植规模为 3 万公顷，全部为新造。



图 4-7 光皮树



图 4-8 油棕树

黄连木，漆树科黄连木属植物，别名楷木、楷树、黄楝树、药树、药木（见图 4-9），中国黄河流域至华南、西南地区均有分布。黄连木种子富含油脂，含油率高达 42.5%，是一种木本油料树种。近年来随着生物柴油的推广，黄连木作为“石油植物新秀”，已引起人们的极大关注。我国黄连木种植重点布局在陕西、河北、河南、湖北、安徽、甘肃、云南、山东、浙江、山西 10 省区，重点区域为太行山南部山地、皖中丘陵区、秦岭中东部山地等 3 个区域；国家规划种植规模为 88 万公顷，其中新造 71 万公顷、改培 17 万公顷。



图 4-9 (a) 黄连木



图 4-9 (b) 黄连木籽

2015 年，油料能源林规模达到 212 万公顷，可利用约 50 万公顷，全部利用折合约 70 万吨标煤。到 2020 年，油料能源林规模达到 422 万公顷，全部进入结实期后，全部利用折合约 580 万吨标煤。

### 3. 淀粉植物

淀粉植物可用于燃料乙醇的生产。我国淀粉类植物资源极为丰富，果实含淀粉较高的植物有锥栗、茅栗、甜槠、苦槠、绵槠、青冈、麻栎、金樱子、楠栎、栓皮栎、田菁、薏



苡、芡实、马棘、铁树籽等，根茎含淀粉的有葛根、野山药、百合、金刚刺、土茯苓、芒蕨、魔芋、贯丛、狗脊、石蒜、蕉芋、木薯、黄精、玉竹、山猪肝等。

栎树（见图 4-10），壳斗科栎属。果实含淀粉较多，可用来制作橡酒、酒精、淀粉、橡油等，发展的重点区域为伏牛山区、皖南浙西山地丘陵区、桐柏 - 大别山区和罗霄山区，涉及河南、湖北、安徽、浙江、江西、湖南等 6 个省。全国栎类树种现有面积约 1600 万公顷，主要分布在内蒙古、吉林、黑龙江，栎类林可年产种子 1000 万吨以上，可生产 250 万吨燃料乙醇。

粉葛（见图 4-11），豆科葛属植物葛的变种，为多年生落叶藤本，粉葛含有大量淀粉。分布于广东、广西、湖南、四川、云南等地栽培或野生于山野灌丛和疏林中。目前，全国葛类总面积约 40 万公顷，年资源总量 150 万吨以上，可生产 50 万吨燃料乙醇。



图 4-10 栎树



图 4-11 粉葛

甜槠（见图 4-12），又称园槠，壳斗科常绿大乔木，是常绿阔叶林的主要树种之一。果实出仁率约 66%，含淀粉及可溶性糖约 61.9%。分布于长江以南各地，包括江苏、安徽、浙江、江西、福建、台湾、湖北、湖南、广东、广西自治区、重庆市、贵州等。

青冈栎（见图 4-13），壳斗科常绿乔木，正名为青冈，别名为紫心木、青栲、铁栲、铁稠，是常绿阔叶林重要组成树种，性耐瘠薄，种子淀粉含量高，我国分布最广的常绿阔叶树种之一。



图 4-12 甜槠



图 4-13 青冈栎

我国淀粉能源林建设规划，2015 年淀粉能源林规模达到 102 万公顷，进入结实阶段的约 40 万公顷，全部利用折合 9 万吨标煤。到 2020 年，淀粉能源林规模达到 313 万公顷（其中新造林 145 万公顷、现有林改培 168 万公顷），进入结实的约 150 万公顷，全部利用

折合 30 万吨标煤。全部进入盛产期后，全部利用折合 60 万吨标煤。

### 4.2.3 畜禽粪便

畜禽粪便是畜禽排泄物的总称，目前我国畜禽养殖业每年产生约 30 亿吨粪便，主要来源于农村家庭散养和规模化养殖。畜禽粪便的主要用途是进行沼气生产。考虑到城镇化和养殖业变化，2015 年我国适宜发展沼气农户 1.30 亿户，沼气产量可达 502 亿立方米，相当于替代 7880 万吨标准煤。根据全国畜牧业发展第十一个五年规划测算，预计到 2015 年，我国规模化养殖场畜禽粪便资源的实物量将达到 32.5 亿吨，约可产出沼气 1950 亿立方米，相当于替代标准煤 3.1 亿吨。

### 4.2.4 生活污水和工业有机废水

生活污水主要由城镇居民生活、商业和服务业的各种排水组成洗衣排水、厨房排水、废油（地沟油）、粪便污水等。工业有机废水主要是酿酒、制糖、食品加工等行业生产过程中排出的废水，它们富含有机物。

### 4.2.5 固体废物

固体废物是指人类在生产、消费、生活和其他活动中产生的固态、半固态废弃物质，主要包括固体颗粒、垃圾、污泥、炉渣、废弃的制品、变质食品、人畜粪便等。

## 4.3 生物质资源开发前景

农林业是发展生物能源的基础，在发展生物能源的战略中，我国《农业生物质能产业发展规划（2007—2015 年）》和《全国林业生物质能发展规划》提出以下重要原则：（1）坚持循环农业理念，推动农业废弃物资源化利用。基于我国农业废弃物量大、利用率低的情况，以解决农村生活能源问题为中心，重点发展农村沼气，秸秆固化成型和气化燃料，从而促进农村用能结构、生态环境的同步改善，以此来推动循环农业大发展。（2）坚持不与人争粮，不与粮争地。正确处理生物质能产业发展和国家粮食安全的关系，稳步开发以非粮作物为主的能源作物，避免出现能源生产与人争粮的情况。以国家粮食安全作为前提，开发能源作物应不占用主粮等战略物资生产用地。（3）坚持技术可行，强化自主创新。坚持把科研攻关、示范推广和技术服务作为主要环节，努力掌握拥有自主知识产权的核心技术和关键技术，着力提高技术转化应用能力。（4）坚持因地制宜和产业协调推进。以经济合理性为前提，以产业为纽带，注重分散与集中的有机结合，合理确定生产规模和发展模式，充分发挥各参与主体的积极性，积极构建原料供应、生产加工、产品利用以及维修服务等完整的产业链条，不断扩大产业规模，提升产业层次，强化产业间的有效对接，促进生物质能产业和相关产业协调发展。

发展能源作物不仅不会威胁粮食安全与环保,相反,发展能源农业将有效促进农民增收并调动农民种粮积极性。

我国生物质能发展在起步阶段,国家各有关部门及社会各界高度重视农业生物质能产业的发展问题,采取了一系列措施,取得了积极进展。但总体上来看,结合我国实际来推进生物质能产业化开发,还存在以下三个方面的问题:

### 1. 原料收集困难

农业生产存在季节性和分散性特点,与生物质能生产的连续性、集中性间存在巨大矛盾。目前,尚未形成规模化、集约化的专用能源农、林基地,不能为企业生产提供稳定、持续的生产原料,影响了生产合理运行;林业资源主要分布在我国东北、西南林区,尚未形成规模化能源林基地,林业生物质原料密度低、单位面积产出低,而且林区交通条件差,每年生产的大量林业剩余物余资源被废弃。因此,需建设和完善服务保障体系,整合资源,完善技术和产业服务体系,全面提升生物质产业服务体系,针对农林生物质分布广、收集运输难等问题,建立健全原料储运、销售与配送系统。引导资本进入能源作物种植、农作物秸秆收集与预处理等领域,完善生物质原料生产与物流体系。

### 2. 原料价格偏高

不考虑石化能源对生态、环境造成的负面影响,目前,大多数生物质能产品的生产成本仍高于石化能源产品,其价格限制了企业的盈利空间,也限制了生物能源的推广。以生物柴油为例,生物柴油售价为6800~7200元/吨,而生物柴油原料菜籽油的价格为7650~8050元/吨,即生产原料价格高于成品的价格;石化柴油的价格为5900~6000元/吨,石化油的价格远低于生物柴油。由于利用生物质能单一性炼制生物柴油、燃料乙醇和生物质燃气比煤、石油、天然气等价格高,无法被市场所接受。根据生物质资源的来源、物化性质、化学结构等特性,设计综合利用工艺,通过联合生产、延长产业链的途径有望解决生物质能成本过高问题。

### 3. 缺乏核心技术

生物质能属于高新技术和新兴产业,从能源转化的技术来看,除沼气技术相对较为成熟外,其他技术还处于产业化发展的初期,缺乏具有自主知识产权的关键技术。如以木质纤维素为原料生产燃料乙醇的技术还需在纤维降解、关键酶的生产、发酵菌株的培育、关键工艺和配套设备优化等方面作进一步的研究;在秸秆固化成型燃料技术方面存在成型机模具容易磨损、运行稳定性差、使用寿命较短的问题;在秸秆的收集、储运和预处理方面存在技术不完善,机械化水平低,相关标准缺乏等问题;秸秆气化生产的燃料也存在焦油含量、能耗高,配套炉具亟待完善。

2014 年全国一次能源生产总量为 36.0 亿吨标准煤，我国农林废弃物实物量为 15 亿吨，约合 7.4 亿吨标准煤，可作为能源利用的生物质资源总量每年约为 4.6 亿吨标准煤，约占全国一次能源生产总量的 13%，目前只利用了不足 2200 万吨标准煤，利用率不到 5%。2020 年实物量和可开发量将分别达到 21 亿吨，约折合 11.65 亿吨标准煤，可作为能源利用的生物质资源总量每年约为 8.3 亿吨标准煤，因此我国的生物质资源潜力巨大，有待充分的挖掘、利用。农业、林木在内的生物质能源可循环使用，又无污染，同时可促进经济、社会的可持续发展。在经济上，大力发展农、林业生物质能，可有效地为农民开辟新的就业渠道，增加农民收入，又能提供价廉、清洁的生活能源，是提高农民生活水平，加快农村小康社会建设的有效途径。在能源结构调整上，充分利用我国生物质能资源，对缓解石化能源供应紧张局面，优化能源结构，保障国家能源安全，建立稳定的能源供应体系具有重大意义。

第 5 章

生物质燃气





“缺油、少气、煤炭资源相对丰富”是我国能源结构的主要特点。2013 年，我国天然气进口 527 亿立方米，天然气对外依存度为 31.6%，能源供应安全问题愈来愈突出。到 2013 年底，合计年产沼气 160 亿立方米，约为天然气消费量的 10%，在一定程度上缓解了我国对天然气的依赖。生物燃气作为一种清洁能源，可以作为天然气替代品弥补国内生产能力不足，保障能源供应安全。

国家能源局下发的《生物质“十二五”规划》中指出“十二五”时期我国生物质能供气的目标为 220 亿立方米，其中沼气用户目标为 190 亿立方米，大型农业剩余物燃气、工业有机物废水和污水处理厂污泥等沼气的目标为 30 亿立方米，生物质燃气的开发已成为国家能源战略重点关注的领域之一。大力发展生物燃气产业有助于环境保护、二氧化碳减排、应对气候变化等，具有十分重要的意义，可以带来一系列生态、社会和经济效益。

所谓生物质燃气是指以生物质为原料通过微生物或热化学途径转化而来的燃气，包括沼气和生物质气化气。沼气是指利用厌氧消化将有机垃圾、废弃农作物及人畜粪便等生物质转化为燃料气体，其主要成分为甲烷。生物质气化气是一种利用热化学途径将生物质转化为燃料气体的途径，在高温条件下使生物质发生不完全燃烧和热解，产生可燃气体，主要成分含有一氧化碳、氢气以及甲烷。

生物质燃气作为一种可再生能源，最突出特点就是清洁，符合可持续发展的要求，具备绿色、清洁、环保等优点。因此，通过技术改进和现代化的装置设备，利用大中型生物天然气工程来提高生物质的转换率，以生物质来生产生物燃气是补充我国常规天然气不足的重要途径。

## 5.1 生物质燃气的发展与现状

### 1. 沼气

早在 1776 年意大利物理学家沃尔塔在沼泽地中发现了沼气。1916 年俄国人奥梅良斯基分离出了第一株产甲烷菌株甲烷菌。1860 年法国 L. 穆拉制造了世界上第一个沼气发生器。随后，在德国、美国出现了备有加热设施及集气装置的消化池，这是现代大、中型沼气发生装置的原型。第二次世界大战后，沼气发酵技术曾一度在西欧国家得到发展，但由于廉价的石油大量涌入市场，沼气技术的发展受到冲击。随着世界性能源危机的出现，沼气又重新引起人们重视。1955 年高速率厌氧消化工艺产生，该技术克服传统沼气发酵工艺产率低、反应周期长的问题，在中温下（35℃～38℃）条件下，新工艺单位容积的产气率由每天 0.7～1.5 立方米提高到 4～8 立方米，滞留时间由十几天或更长的时间缩短到几天甚至几个小时。

上世纪 20 年代初，罗国瑞在广东省潮梅地区建成了我国第一个沼气池，随之成立了中华国瑞瓦斯总行，以推广沼气技术。近年来我国沼气行业发展迅速，2003 年至 2014 年间，我国已投入上千亿元支持沼气发展，其中中央投资 364 亿元。目前，全国农村沼气用户为 4300 多万户，产沼气 140 亿立方米；大中型沼气工程近 10 万处，产沼气 20 亿立方

米,我国沼气行业的蓬勃发展为生物质的再利用以及生物经济的发展提供了重要支撑。

## 2. 生物质气化气

生物质中含有大量的水分,在直接燃烧过程中,大量的热量以气化潜热被烟气带走,燃烧效率低下,同时带来环境污染等问题。生物质热解气化技术可以将固体生物质原料转变成气体燃料,使其使用更加方便清洁,提高了能源利用效率。所产生的燃气则可用于集中供气、供热或发电等。生物质气化技术的发展已有 100 多年的历史,早期的生物质热解气化技术主要是将木炭气化后用作内燃机燃料。20 世纪 70 年代,美国、日本、欧盟等国家、地区启动了生物质热裂解气化技术与开发,到 20 世纪 80 年代,美国可再生能源实验室开展了生物质燃气联合循环的蔗渣发电系统的研究;德国鲁奇公司建立了 100 MW 生物质燃气联合循环发电系统示范工程;瑞典能源中心利用生物质气化、联合循环发电等先进技术在巴西建一座装机容量为 20 ~ 30 MW 的蔗渣发电厂;荷兰特温特大学进行流化床气化器和焦油催化裂解装置的研究,推出了无焦油气化系统,还开展研究将生物质转化为高氢燃气、生物油等高品质燃料,并结合燃气轮机、燃料电池技术,将生物质转化为电能<sup>[1]</sup>。生物质气化技术在发达国家受到广泛重视,如奥地利、丹麦、芬兰、法国、挪威、瑞典和美国等国家生物质能在总能源消耗中所占的比例增加相当迅速。

我国生物质气化技术研究始于上世纪 80 年代初期,经过 20 年的努力,我国生物质气化技术日趋完善,至今已广泛开展了生物质能高品位转换技术以及装置的研究和开发,形成了生物质气化集中供气、燃气锅炉供热、内燃机发电等技术,把农林废弃物、工业废弃物等生物质能转换为高品位的煤气、电能或蒸气,提高生物质能源的利用效率,实现以生物质替代气、油和煤。从单一固定床气化炉发展到流化床、循环流化床、双循环流化床和富氧气化流化床等高新技术;由低热值气化装置发展到中热值气化装置;由户用燃气炉发展到工业烘干、集中供气和发电系统等工程应用,建立了各种类型的试验示范系统<sup>[1]</sup>。

## 5.2 生物质燃气的生产方法

生物质燃气的开发主要包括热化学途径和生物转化途径。前者利用高温缺氧条件使生物质发生不完全燃烧和热解,产生可燃气体,主要成分是 CO、H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 等。后者是以生物质为原料,在厌氧条件下利用厌氧菌将生物质转化为沼气,主要成分是 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>。

### 5.2.1 热化学法制备生物燃气

生物质气化技术是一种热化学处理技术,气化技术是目前生物质能利用技术研究的热门方向。通过气化炉将固态生物质转换为使用方便而且清洁的可燃气体,用作燃料或生产动力。其基本原理是生物质原料进入气化炉后被干燥,伴随着温度的升高,析出挥发物,并在高温下热解。热解后的气体和炭在气化炉的氧化区与供入的气化介质(空气、氧气、水蒸气等)发生氧化反应并燃烧。燃烧放出的热量用于维持干燥、热解和还原反应,最终生成了含有 CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> 等烷烃类碳氢化合物的燃气<sup>[2,3]</sup>。

### 5.2.1.1 生物质气化

生物质气化有多种工艺，依据气化过程是否依赖气化介质，可分为干馏工艺和气化工艺。生物质气化过程是一种复杂的热化学过程，其中既含有非均相反应又含有均相反应，其主要发生的反应是：①生物质碳与合成气之间的非均相反应；②合成气之间的均相反应。由于反应工艺、设备的差异，和反应条件（如反应原料种类及含水率、气化剂种类、反应温度及时间、有无催化剂及催化剂的性质等）的不同，气化过程也千差万别。

#### 1. 干馏工艺

干馏裂解气化是指在隔绝空气的情况下进行的生物质热解气化，使生物质中有机物受热逐渐分解，得到产物包括炭、木焦油、木醋液和气化气。气化气的主要成分是  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2$  等，气化气热值为  $15\text{MJ}/\text{m}^3$ ，属于中热值燃气。干馏的特点是生物质在隔绝空气条件下进行热分解，生产过程须外加能源，可通过控制热解温度及加热速率来调控气化气的产量和组成。

#### 2. 气化工艺

气化其工作原理是在一定的热力学条件下，借助气化剂作用，使生物质纤维素和木质素等高聚物发生热解、氧化、还原、重整反应，最终得到含  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和烃类等小分子化合物的燃气。根据气化过程中采用的气化介质的不同，又可分为空气气化、氧气气化、水蒸气气化、空气 - 水蒸气气化以及和氢气气化等几种形式。生物质通过气化技术是一种热化学转换利用技术，可将低品质生物质通过反应器转化成高品质清洁燃气的过程。适用于农作物（如玉米、棉花等）秸秆的气化。

##### （1）空气气化

空气气化是指以空气作为气化剂，在高温下使生物质与空气中的氧气发生氧化反应产生可燃气体的过程，该反应为放热反应，整个气化过程是一个自供热系统，不需要额外提供热量。由于空气可以任意获取，气化反应过程又不需要额外热源，所以空气气化是一种极普遍、经济、设备最简单且容易实现的气化形式。其缺点是空气中含有 79% 氮气，它不参加反应，却稀释了燃气的浓度，降低了燃气热值，一般约为  $4200 \sim 7560\text{kJ}/\text{m}^3$ 。

##### （2）氧气气化

氧气气化是指利用富氧与生物质进行不完全燃烧，产生燃气的过程。与空气介导的气化过程相比，由于没有惰性气体氮气的稀释，减少了加热氮气所需的热量，反应器容积减少，氧气气化反应速率明显加快，气化热效率提高，气化气热值提高 1 倍以上，得到的气化气热值约为  $10920 \sim 18900\text{kJ}/\text{m}^3$ ；由于氧气气化气的热值大小与煤气相当，该技术可用于建立集中生活供气系统，也可以生产合成气，取得更好的效益。但由于反应过程需要纯氧，还需要昂贵的制氧设备，需要额外动力消耗，生产成本较高。

##### （3）水蒸气气化

水蒸气气化是以高温水蒸气作为气化剂，气化过程中水蒸气与炭发生还原反应，生成一氧化碳和氢气，同时发生一氧化碳与水蒸气的变换反应，得到的气化气组成如下： $\text{H}_2$  20% ~ 26%， $\text{CO}$  28% ~ 42%， $\text{CO}_2$  23% ~ 16%， $\text{CH}_4$  20% ~ 10%， $\text{C}_2\text{H}_2$  4% ~ 2%， $\text{C}_2\text{H}_6$  1%，燃气热值  $10920 \sim 18900\text{kJ}/\text{m}^3$ 。产物中氢气和甲烷的含量较高，属中热值燃气，由于该反

应以吸热为主,需要提供外热源来维持该反应过程。相比于空气—水蒸气等气化方式,水蒸气气化产氢率高,燃气质量好,热值高。由此可见,水蒸气气化是一种有效的将低品质生物质转化为高品质氢能的利用方式。难点是技术较复杂,反应过程不易控制。

#### (4) 空气—水蒸气气化

空气—水蒸气气化是指以空气和水蒸气作为气化介质,利用介质与生物质反应生成富含  $H_2$ 、小分子烃类以及  $CO$  气体的过程。反应属于自供热系统,不需外供热源,该反应能得到热值为  $11500\text{kJ/m}^3$  的中低热值的燃气。

#### (5) 氢气气化

氢气气化是指以氢气作为气化剂,利用氢气与生物质中固定碳以及水蒸气反应生成甲烷的过程。反应得到的高热值燃气,燃气热值可达到  $22260 \sim 30000\text{kJ/m}^3$ 。主要问题是氢气气化反应的条件极为苛刻,需要在高温高压下进行,能耗较高,产业化难度大。

### 5.2.1.2 生物质气化装置

气化炉是生物质气化的关键设备,可利用固定床气化炉或流化床气化炉进行生物质气的生产,在高温下气化炉将低效能的固体生物质转换成高效能的可燃气体。

#### 1. 生物质固定床气化炉

固定床可分为有上吸式、下吸式和开心式3种。其中下吸式固定床气化技术成熟,应用最为广泛。一般而言,固定床气化炉适合应用于中小型、间歇性运行的气化发电系统,它的最大优点设备结构简单紧凑,操作便利。在生产中,固定床气化炉操作温度为  $650^\circ\text{C} \sim 750^\circ\text{C}$ ,适用的原料主要有稻壳、木屑、颗粒等,原料不用预处理直接进料即可,得到的燃气中灰分含量较低,可以采用简单的过滤方式净化燃气。最大的问题是得到的生物质气热值低,焦油含量较高,生产过程中容易造成管路堵塞。

#### 2. 流化床生物质气化炉

流化床气化炉包括鼓泡流化床、双循环流化床、循环流化床等,其中应用最多的是循环流化床(见图5-1)。流化床没有炉栅,通常由燃烧室、布风板组成,气化剂通过布风板进入流化床反应器中。在生物质气化时,生物质经进料装置加入到流化床中与高温床料迅速混合,并发生激烈翻滚,

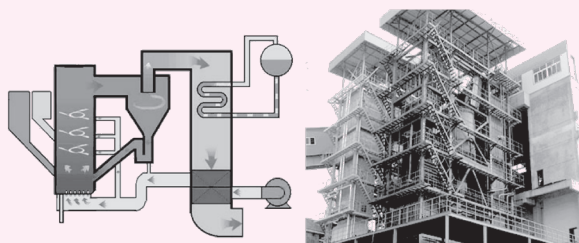


图5-1 循环流化床

同时完成干燥、热解、燃烧及气化过程,迅速将生物质转化为燃气。由于流化床气化炉运行时,炉内温度高而且恒定,生物质能均匀受热,加热过程迅速,气化反应速度快,生产的燃气产率高、焦油含量低,流化床适合于大型的工业供气系统。

### 5.2.1.3 生物质气化气的净化

由于热化学法获得的生物气化气中常混有副产物焦油,净化工艺的目的主要是清除



气化气中的焦油组分。在生物质气化过程中，发生了多种热化学反应致使气化气成分复杂，其中组分含量大于5%的有7种：苯、甲苯、二甲苯、萘、苯乙烯、酚和茚。以焦油为代表的组分严重影响了气体的品质。

去除焦油是生物质气化气净化的主要目标。由于焦油在低温下容易凝结成液体与水、焦炭颗粒粘合在一起，在管道输送过程中容易造成输气管道、阀门等设施的堵塞。此外，更严重是焦油难以完全燃烧，产生的炭黑会对内燃机、燃气轮机等燃气设备造成损害。目前的气化技术将原始气中的焦油含量控制在 $0.5 \sim 2\text{g/Nm}^3$ 以下非常困难。一般而言，在生物质气化发电系统中，气中焦油含量在 $0.02 \sim 0.5\text{g/Nm}^3$ 范围内才可接受，所以气化气需要进行除焦净化处理。

目前的气化气除焦的处理方法分为湿法、干法及裂解法三种。

### 1. 湿法除焦

湿法除焦是生物质气化气净化工艺中最为常用的方法，我国生物质气化燃气净化主要是以湿法除焦为主。湿法除焦就是利用水洗气体，使气体快速降温，从而将气体中焦油组分冷凝并从气化气中分离出来。湿法净化系统优点是设备成本较低、操作简单。不足是湿法除焦的净化效果只能勉强达到内燃机的要求，因此湿法除焦净化系统只能作为初步净化系统，此外，在除焦过程中需要大量用水，含焦油的废水不好处理，外排则易造成环境污染。

### 2. 干法除焦

采用过滤技术净化生物质气化气是干法除焦的典型工艺，将生物质气化气通入填装吸附性强的材料（如活性炭等）容器，或将生物质气化气穿过装有滤纸或陶瓷芯的过滤器，利用净化装置中的吸附材料将焦油截留。生产时可根据气化气中所含杂质含量的多少，采用多级过滤的净化方法。干法除焦的优点是净化过程中可以避免如湿法净化所带来的水污染问题。在实际操作过程中，由于焦油容易沉积在滤芯上且沾附焦油的滤料难以处理，少有作为单独的净化装置使用，多与其他净化装置连用。

### 3. 裂解法除焦

催化裂解除焦是生物质气化燃气净化技术的研究热点。裂解净化技术是指在高温下将气化气中的焦油裂解为可利用的可燃性气体，从而将焦油除去。裂解途径可细分为热裂解、催化裂解以及电裂解。通常在 $1100^\circ\text{C}$ 以上条件下，方能将焦油组分除去，若在气化过程中加入裂解催化剂，可以大大降低裂解温度（目前常用的裂解催化剂主要为白云石和镍基催化剂），即使在 $750^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ 温度下，也能将绝大部分焦油裂解成小分子的气体。通过催化裂解法将焦油转化为可燃气，既提高焦油的利用率，又避免了水洗除焦工艺，减少二次污染。在生物质燃气的焦油净化技术中，通过裂解除焦可使燃气产量提高 $10\% \sim 20\%$ 热值，使 $\text{H}_2$ 体积含量增加了 $4\% \sim 7\%$ ，而 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 相对变化不大。该方法既能实现气化气的净化，又能提高气化气的产量。



生物质气化气通过净化除焦、除硫后，气体热值偏低问题是影响气化气使用的最大障碍，由于生物质气化气中可燃性成分少，热值偏低（ $5\text{MJ}/\text{m}^3$  左右），不到天然气热值的  $1/7$ （天然气热值为  $35.88 \sim 39.82\text{MJ}/\text{m}^3$ ），为了满足热负荷的要求，就要消耗大量的生物质气化，这就需要配套更大体积的储气柜，限制了气化气的使用范围。

## 5.2.2 生物法生产生物质燃气

生物途径获得生物质燃气是指利用厌氧消化技术将生物质转化为燃气的方法。所谓厌氧消化是指在厌氧条件下，依靠厌氧微生物的协同作用将生物质中的碳水化合物、蛋白质和脂肪转化成甲烷、二氧化碳、氢及其他产物的过程，即我们通称的沼气发酵。

沼气是一种混合气体，它的主要成分是甲烷，还混有二氧化碳、硫化氢、氮气及其他一些成分。沼气的组成中，可燃成分包括甲烷、一氧化碳等气体；不可燃成分包括二氧化碳、氮和氨等气体。不同生物质原料进行厌氧消化后得到的沼气组分有所差别，一般在沼气中，甲烷含量为  $50\% \sim 80\%$ 、二氧化碳含量为  $20\% \sim 40\%$ 、硫化氢平均含量为  $0.1\% \sim 3\%$ 。沼气是一种优良的二次能源，每立方米沼气的发热量约  $20 \sim 25\text{MJ}/\text{m}^3$ ，从热效率分析，每立方米沼气所产生的热量，相当于燃烧  $0.7\text{kg}$  煤所产生的热量。

沼气发酵流程如图 5-2 所示，其中生物质的厌氧消化（发酵）和沼气的净化处理沼气生产的关键过程。

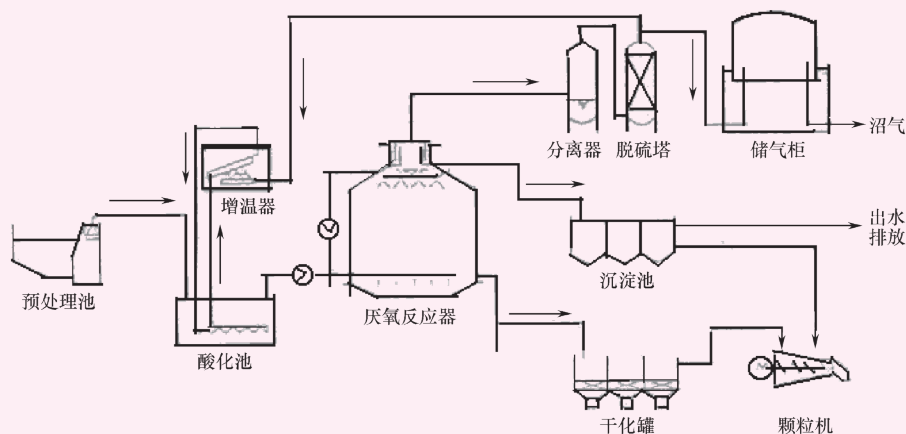


图 5-2 沼气发酵的基本工艺流程图

### 5.2.2.1 生物质厌氧消化生产沼气

生物质进行厌氧消化可分三个阶段：首先将生物质中不可溶的复合有机物会转化成可溶化合物，即水解阶段；然后可溶化合物再转化成短链酸与乙醇，即酸化阶段；最后经各种厌氧菌作用转化成气体（沼气），即产甲烷阶段。

沼气发酵微生物包括有机质分解菌（不产甲烷微生物）和产甲烷菌两大菌群，人工制取沼气的核心菌落是甲烷菌群，自然界一切具备厌氧条件和有机物的地方都可以找到它们的踪迹（如，池塘、湖泊、下水道，甚至反刍动物的瘤胃中）。不同发酵阶段，由不同

微生物菌群参与发酵（见图 5-3），参与沼气发酵的菌群包括以下三大类：（1）发酵性细菌，它们能将纤维、半纤维、淀粉、蛋白质、脂肪等复杂有机物分解成乙酸、丙酸、丁酸等简单的小分子量的物质，为产甲烷菌提供基质；（2）产氢产乙酸菌，它们将发酵细菌分解的产物转化为乙酸、二氧化碳；（3）产甲烷菌是沼气发酵微生物的核心（见图 5-4），它们严格厌氧，适宜在中性环境中繁殖，依靠乙酸、二氧化碳和氢作为营养，产出甲烷气体。

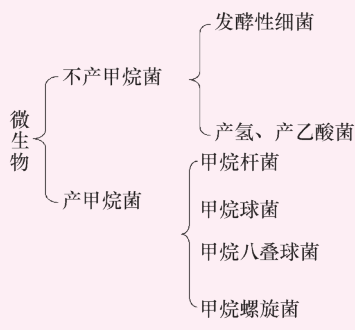


图 5-3 参与沼气发酵的微生物



图 5-4 污泥中的产甲烷菌

1. 水解与酸化阶段

该阶段的主要作用是将生物质中的有机物降解为可溶性的有机物小分子，如葡萄糖、氨基酸等，例如多糖转化为单糖，蛋白质转化为肽或氨基酸，脂肪转化为甘油和脂肪酸。生物质中的大分子有机物首先被发酵细菌所分泌的胞外酶水解为可溶性糖、肽、氨基酸和脂肪酸后，才能被产甲烷的微生物所吸收利用。参与本阶段的水解性细菌包括专性厌氧菌和兼性厌氧菌。专性厌氧菌如梭菌属、丁酸弧菌属、拟杆菌属、真杆菌属和双歧杆菌属等；兼性厌氧菌如链球菌属和一些肠道杆菌等。在以上微生物的作用下，纤维素、淀粉等糖类水解成单糖，并进而形成丙酮酸；把蛋白质水解成氨基酸，并进而形成有机酸和氨；把脂类水解成甘油和脂肪酸，并进而形成丙酸、乙酸、丁酸、琥珀酸、乙醇、 $H_2$  和  $CO_2$ 。

酸化过程是典型的发酵过程，微生物的代谢产物主要是各种有机酸。水解酸化的目的是为混合厌氧消化过程中甲烷发酵提供底物。在厌氧消化系统中，水解酸化细菌的功能表现在两个方面：①将大分子不溶性有机物水解成水溶性有机物小分子；②菌体将水解产物转化，作为参与下一阶段生化反应菌群可利用的基质。

2. 产酸产乙酸阶段

该阶段的主要作用是将前一类菌群分解的产物进一步转化为乙酸和二氧化碳。水解和酸化阶段所产生的有机酸和醇类，除甲酸、乙酸和甲醇外，均不能被产甲烷菌所利用，必须由产氢产乙酸菌将其进一步分解转化为乙酸、氢和二氧化碳。产氢产乙酸菌的代谢特点是以质子作为唯一的电子受体。产氢产乙酸菌群在营养生态位上位于产酸发酵菌群和产甲烷菌群之间。在功能生态位上起到承上启下的重要作用，能将产酸发酵菌群代谢产生的丙酸、丁酸等挥发性有机酸和乙醇等进一步降解转化为乙酸和  $CO_2$ 、 $H_2$ ，为后续的产甲烷菌群提供可以直接利用的底物<sup>[4,5]</sup>。

### 3. 产甲烷阶段

该阶段的目的是利用产甲烷菌将上一阶段产生乙酸、氢气和二氧化碳作为底物，将它们转化为甲烷。产甲烷菌属于原核生物，包括食氢产甲烷菌和食乙酸产甲烷菌，是专性严格厌氧菌，对氧非常敏感，遇氧后会立即受到抑制，不能生长、繁殖。该过程中，产甲烷菌群利用一碳化合物（ $\text{CO}_2$ 、甲醇、甲酸、或  $\text{CO}$ ）、二碳化合物（乙酸）和  $\text{H}_2$  产生甲烷，完成了生物质到生物质燃气（沼气）的转化。由于产甲烷微生物是严格的厌氧菌，只能在无氧的生态环境中生存和繁殖<sup>[6]</sup>，建造一个不漏气的厌氧发酵装置是制取沼气的首要条件（见图 5-5）。



图 5-5 人工修建的沼气池

#### 5.2.2.2 沼气的净化

沼气中主要含  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ ，还有少量的  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{NH}_3$ ，以及少量的  $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$  和 卤化烃。早期，沼气通过传统工业沼气锅炉进行燃烧、利用，但这种低附加值沼气利用方式已经不适合沼气产业规模化、商业化的发展。将沼气纯化后，使其甲烷含量达到 97% 以上，得到这种高甲烷含量的沼气又称为“生物天然气”，可被用作汽车燃料，并入天然气管网，从而产生更大的经济价值。目前，我国还没有针对沼气来源的管输天然气和车用压缩天然气的相关标准，现在主要参照气田、油田来源天然气的标准 GB17820-2012《天然气》和 GB 18047-2000《车用压缩天然气》标准，《天然气》标准适用于经预处理后通过管道输送的生物天然气，《车用压缩天然气》适用于用作车用燃料的压缩生物天然气。

发酵得到的沼气中含有大量的杂质，沼气的浓缩、净化工艺是提升沼气品质的重要环节。只有通过净化才后的沼气能并入天然气管网，才能用于热电联产或用作汽车燃料，从而更好提升沼气的经济价值。发酵得到的沼气中二氧化碳占比达 20% 以上，而沼气中甲烷的质量分数达到 97% 以上才能到达汽车燃料的标准，因此，必须将沼气中的二氧化碳进行清除才能获得高品质的生物天然气；另一方面，沼气中还混有硫化氢、水分、卤化物等杂质成分，它们直接影响沼气的品质，所以净化过程是推进沼气产业化应用的关键。

#### 1. 沼气中 $\text{CO}_2$ 的去除

沼气含有大量  $\text{CO}_2$ ，除去沼气中的  $\text{CO}_2$  是提高沼气中甲烷含量的关键，二氧化碳去除工艺主要包括水洗工艺、聚乙二醇洗涤工艺、变压吸附工艺和膜分离工艺。

### (1) 水洗工艺

二氧化碳在水中有较大的溶解度，而甲烷在水中的溶解度较小，当沼气与水接触后，可利用水将沼气中的二氧化碳进行吸附，水洗还可以去除沼气中的  $\text{H}_2\text{S}$ ，此吸收过程是纯粹的物理反应。沼气通过压缩后从吸收塔底部进入，水则从吸收塔顶部进入进行反相流动吸收，吸收了  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的水可以再循环使用。

### (2) 聚乙二醇洗涤工艺

二氧化碳在聚乙二醇中的溶解度比甲烷大，和水洗工艺类似，可以利用聚乙二醇对二氧化碳、甲烷溶解能力的差异将沼气中的二氧化碳除去。由于二氧化碳在聚乙二醇中溶解度比在水中的溶解度更大，相对于水洗工艺，所需聚乙二醇的量会减少，更加经济和节能。

### (3) 变压吸附工艺

变压吸附提纯法是通过控制吸附塔压力，使吸附剂（如分子筛）选择性吸收沼气中的二氧化碳来实现将沼气中二氧化碳进行脱除的目的。在加压条件下，沼气中的二氧化碳被吸附在吸附塔内，而甲烷等其他弱吸附性气体作为净化气排出，当吸附饱和后将吸附柱减压甚至抽成真空使被吸附的二氧化碳释放出来，吸附剂可反复使用。

### (4) 膜分离工艺

膜分离提纯法是利用甲烷与二氧化碳过膜的渗透性差异来实现二者分离，在压力驱动下，二氧化碳过膜的渗透速率较快，作为快气以透过气形式排出，而甲烷气体的渗透速率较慢，作为慢气以透余气形式获得提纯产品气。在生产中，为了提高甲烷气的浓度，可采用多级膜分离工艺。

## 2. 沼气脱硫

由于生物质中蛋白质内含有硫元素，发酵后，产生的沼气中夹杂  $\text{H}_2\text{S}$  气体，硫化氢气体的多少与生产沼气的原料有关，此外沼气中硫化氢含量还与参与厌氧发酵的工艺、操作条件等有很大关系。一般来说，利用城市污水所产生的沼气中  $\text{H}_2\text{S}$  含量大致为  $7.5 \sim 7.8\text{mg/L}$ ，屠宰场污水产生的沼气中  $\text{H}_2\text{S}$  含量为  $1.7 \sim 2.0\text{mg/L}$ ，禽畜养殖厂污水产生的沼气中  $\text{H}_2\text{S}$  含量为  $1.2 \sim 1.8\text{mg/L}$ ，酒厂、酒精厂、淀粉厂有机污水产生的生物燃气中  $\text{H}_2\text{S}$  含量为  $1.0 \sim 3.0\text{mg/L}$ 。

硫化氢是酸性腐蚀性气体，可以和大部分金属反应，为防止沼气利用时腐蚀压缩机、气体储存罐和发动机，必须去除沼气中的硫化氢。最常用沼气脱硫的方法包括生物脱硫法、湿法脱硫法和干法脱硫法。

### (1) 生物脱硫技术

所谓生物脱硫是指利用微生物将沼气中的硫化物降解，生物脱硫塔如图 5-6 所示沼气中的硫化物可以通过硫化细菌去除。生物脱硫技术是 20 世纪 80 年代发展起来的。在脱硫过程中，脱硫微生物在有氧条件下，通过控制氧化还原电位和溶解氧浓度，将还原态硫（ $\text{H}_2\text{S}$ ）氧化为高价态硫。常见的脱硫微生物都属于硫杆菌属，它们大多为自养，包括脱氮硫杆菌、氧化硫硫杆菌、氧化亚铁硫杆菌等，在微氧条件下将  $\text{H}_2\text{S}$  氧化成单质或氧化为硫酸根。与传统化学脱硫法相比，生物脱硫技术具有运行成本低、无需化学催



化剂和氧化剂、无二次污染、能耗低且可回收单质硫等优点。

### (2) 湿法脱硫技术

湿法脱硫是指利用溶解于溶剂中的脱硫剂与沼气中的硫化氢发生反应，将气相中的硫化氢吸收到液相中从而将其脱除。吸收硫化氢后的吸收液可以通过物理或化学方法循环再生，从而湿法脱硫装置的连续运行。

根据吸收液与硫化氢的作用原理不同，湿法脱硫可以分为吸收法与氧化法。前者是利用碱性吸收液（如碳酸钠、氨水、醇胺等）与酸性气体  $\text{H}_2\text{S}$  发生酸碱中和反应，后者是利用氧化剂将硫化氢进行氧化。

### (3) 干法脱硫技术

干法脱硫是指用固体脱硫剂与沼气中的  $\text{H}_2\text{S}$  发生气固两相作用，从而将硫脱除。在脱硫过程中分物理吸附和化学吸附两类。前者是硫化物与多孔吸附剂的表面接触后被吸附在吸附剂的表面，后者是指硫化物与固体脱硫剂发生化学反应生成单质硫或固体硫化物。

活性炭吸附脱硫，既包括物理吸附，同时也发生化学吸附。活性炭脱硫剂是一种高比表面积的微孔活性炭，具有发达的孔隙结构，活性炭脱硫剂的所有孔径和表面积可储存大量的硫元素。活性炭脱硫剂不同于普通的吸附活性炭，活性炭脱硫剂有特别高的  $\text{H}_2\text{S}$  去除能力。脱硫过程中，首先是活性炭表面吸附氧，形成活性中心的表面氧化物，然后气体中的  $\text{H}_2\text{S}$  分子与化学吸附的氧发生反应， $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$ ，生成的硫磺沉积在活性炭发灰的微孔中。活性炭脱硫效果好、操作简单，但需要定期更换，运行成本较高，对于含硫量较高的沼气，需要与湿法脱硫或生物脱硫工艺结合。

氧化铁脱硫法也是一种传统实用的脱硫方法，属于化学吸附脱硫法。在常温下，硫化氢气体可与氢氧化铁、氧化铁反应生成硫化铁，产生的硫化铁可以被空气氧化再生，形成氧化铁或者氢氧化铁和单质硫。在氧化铁的表面上会覆盖一层单质硫，在经过很多次重复使用后，就需要更换氧化铁或氢氧化铁。该方法具有造价与运行成本均较低，反应条件温和的特点，脱硫过程可在常温进行。

## 3. 沼气脱水

沼气中的水分能加速管道、阀门及流量计的腐蚀。脱除沼气中水分的常见方法有冷凝法、吸附法。具体采用何种脱水方法，应根据沼气的气质情况、用气要求、以及经济成本比较后确定。冷凝法的原理是通过调节压力使沼气降温，从而使沼气中的水分冷凝成液态而将其除去；吸附干燥法是指利用硅胶、氧化铝、氧化镁或分子筛等干燥剂来吸附沼气中的水分，将待干燥的沼气通过吸附床进行干燥。



图 5-6 沼气生物脱硫塔



#### 4. 脱除卤化烃

沼气中卤化烃含量较高，卤化烃也具有较强的腐蚀性。将沼气流通入装填有吸附剂（如活性炭）的净化装置中，通过控制吸附剂的孔径大小，使  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$  等小分子通过，而卤化烃等大分子被截留、除去。

#### 5. 脱除硅氧烷

沼气中还含有机硅化合物，它主要以线性或环状的甲基硅氧烷类化合物，沼气在燃烧过程中，硅氧烷会被氧化为坚硬的氧化硅，颗粒物状的氧化硅如果沉积在火花塞、阀座或发动机燃烧室部件上，将严重影响设备运行。去除硅氧烷的途径主要有吸附法和冷冻法，吸附法是利用特定孔径分布的活性炭来吸附沼气中的硅氧烷气体；冷冻法是将沼气冷却，使硅氧烷由气体转化为液态或固态析出。

#### 6. 脱氧和脱氮

沼气生产和收集过程中有时会混入空气。当氧气浓度过大就会有安全隐患，甚至会有爆炸的危险，而氮气的混入则降低甲烷的浓度、影响沼气的热值。在生产中，氧气和氮气可以通过膜分离或者变压吸附法去除。

沼气净化处理过程涉及脱除  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、卤化烃、硅氧烷、氧、氮、固体颗粒物等

工序，工艺技术方案的选择至关重要。其中，以脱硫工艺的选择最为关键。尽管成熟的脱硫、脱水、除尘技术很多，但各有其特点和适用范围，加之沼气的来源不同、杂质含量差异较大，且下游利用环节对气质要求又各不相同，因此，需要因地制宜，依据各用气装置对硫化氢控制指标的具体要求，结合项目工程造价、场地条件、运行成本、操作强度等因素，对各种工艺技术进行集成优化，使项目都能搭配适用的成套净化处理工艺，以期达到经济效益最优化目标。

沼气通过净化后可通过气柜进行储存以备使用。沼气的储存一般分为湿式和干式两种。由于双膜沼气储气柜的结构简单、安全、无须过多维护，目前常利用双膜储气柜进行沼气的储存（见图 5-7），气柜由底膜（一体化气柜除外）、内膜、外膜、恒压控制柜、安全保护器及一些控制设备和辅助材料组成。底膜、外膜

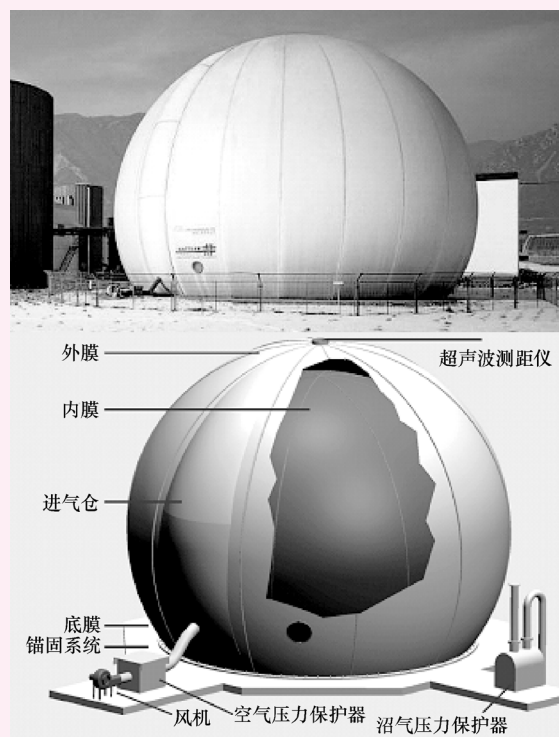


图 5-7 储气设备（双膜干式储气柜）

共同形成一个密闭储气空间。运行工程中，当罐内沼气压力较低时，压力传感器提供信

号给系统，气泵向调压室注入空气，在压力的作用下内膜向下运动挤压沼气，使沼气压升高，到达设定压力时停止注入空气。当罐内压力超过设定值时，电磁泄压阀启动将调压室空气排出使得内膜伸展，平衡沼气压。为不让气体混合，储存的气体与调压空气之间使用内膜隔离开。

近年，我国厌氧发酵技术发展较快，其工艺技术能基本达到工业化需求，与国外相比，我国在处理固体有机物方面的厌氧技术还有较大差距，存在问题主要表现在：厌氧发酵产气率低，系统运行和管理自动化水平不高；厌氧发酵和综合利用配套技术和设备还不成熟。在沼气应用方面，虽然沼气发酵的发展对解决农村能源问题能起到了巨大作用，但仍局限于自产自用的家庭模式，沼气没有成为商品，厌氧发酵技术产业化发展缓慢，没有大规模向市场推进。在生产上，由于没有进行规模化生产，沼气的发酵还受季节和地域限制，特别是在北方寒冷地区，沼气生产和利用受到很大的限制<sup>[7]</sup>。

### 5.3 生物质燃气的应用前景

当前沼气和生物质气化气是生物质燃气的两种主要类型，自身发展各具优势同时也面临不同挑战。

2015 年我国投资 20 亿元用于沼气项目转型升级，优先支持生物天然气为重点的超大型工程。但产业沼气产业链的原料和终端市场不够规范，原料的收集、储存、运输体系尚未构建完善，造成收集、运输和储存成本较高，部分地区对有机废弃物依然随地焚烧和排放；另外，原料的交易价格波动较大，坐地涨价现象非常普遍，增大了企业投资、生产风险。总体而言，沼气生产和运行的成本还较高；技术上而言，沼气工程提供的燃气的稳定性、适用性还待进一步提高。

通过提升沼气中甲烷的含量可使“沼气”向高品位的“生物天然气”方向发展，当沼气中甲烷占比提纯到 97% 以上，其品质与石化天然气相同，此时的沼气又称为“生物天然气”。由于“生物天然气”与常规天然气的理化特性相同，可以将其通过管网、槽罐车等输送到下游用户，大大拓展了沼气的使用途径。沼气的综合利用如图 5-8 所示，随着技术的发展、生产成本、管理费用的降低，“生物天然气”的优势会日益凸显。

目前，我国生物质气的生产大多采用以空气为气化剂的常压固定床气化技术，生产的燃气质量不稳定，且存在燃气热值低，暂不能达到城市居民燃气使用标准；此外，在生物质气净化方面，对燃气的净化及焦油的处理大多采用水洗工艺方法，净化效率不高，气体中焦油含量较高，燃气净化及焦油的处理有待于改进；生物质气化成套装置尚缺乏长时间的运行验证，可靠性及使用寿命尚待确定；在标准规范方面，生物质燃气的集中供气系统质量标准与施工规范也未形成，上述因素制约了生物质气化技术在我国商业化推广，生物质燃气的发展还面临巨大挑战。

然而，生物质气化应用途径很灵活，可根据当地的实际情况，既用于小型发电站发电，也可以作为居民生活燃气，甚至可作为供热、工业窑炉的燃料等。以生物质气化发电为例，与目前应用最多的生物质直燃发电相比，生物质气化发电可以根据规模的大小

灵活选用合适的发电设备，工艺上可以采用内燃机，也可以采用燃气轮机，甚至结合余热锅炉和蒸气发电系统。当前，我国在边远地区电力供应方面还存在较大的缺口，此外，大量丢弃或焚烧农业废弃物将造成环境污染，因地制宜地利用当地生物质能资源建立小型的生物质气化发电站，通过生物质气化发电来有效地利用农业废弃物，可解决电力不足的问题，提高人民的生活水平。

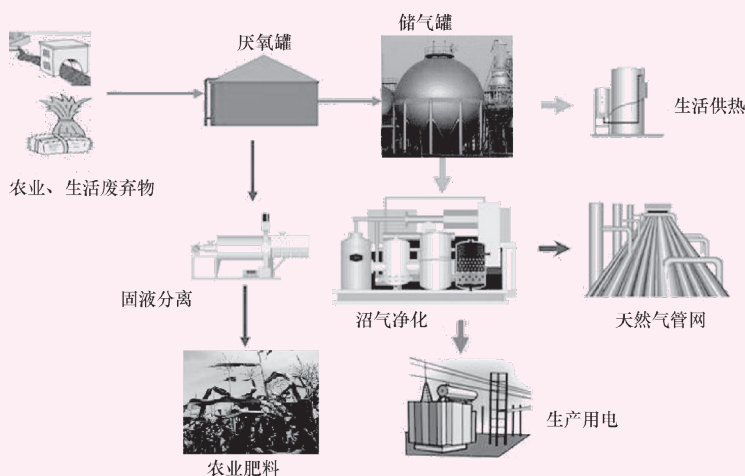


图 5-8 沼气综合利用

我国的生物质燃气产业有广阔的发展空间。随着天然气产业在财税政策、技术装备、工程规模、产业模式、环境效益等方面的规范，生物质转化技术水平的提高，生物质燃气的开发作为利用生物质资源利用的重要途径，将对我国实施可持续发展战略，促进国民经济发展和环境保护方面发挥重大意义。

## 参考文献

- [1] 应浩, 蒋剑春. 生物质气化技术及开发应用研究进展 [C]. 林产化学与工业. 2005: 151-155.
- [2] 王建楠, 胡志超, 彭宝良等. 我国生物质气化技术概况与发展 [J]. 农机化研究, 2010, 32(1): 198-201, 205.
- [3] 傅木星. 生物质水热法液化行为研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [4] 马超. 产氢产乙酸优势菌群的选育及其生理生态特性研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2008.
- [5] 高晨晨. 产氢产乙酸菌互营共培养体 B6 的选育及其菌群组成的优化 [D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] 李建政, 孙倩, 刘枫等. 一种产氢产乙酸菌互营共培养体的筛选及其群落结构解析 [J]. 科技导报, 2009, 27(16): 78-82.
- [7] 李文哲, 张波. 生物质能源现状与发展 [J]. 现代化农业, 2006, (11): 1-5.

第 6 章

生物柴油



生物柴油是指以动、植物油脂为原料油，通过酯化或酯交换工艺制成的脂肪酸甲酯或脂肪酸乙酯。随着经济发展，汽车数量越来越多，尾气的排放造成严重的城市污染，与石化柴油相比，生物柴油能显著降低二氧化碳和硫化物的排放。生物柴油具有良好的生物降解性，其降解速度比石化柴油快四倍，在淡水环境中，经过 28 天，生物柴油能降解 77% ~ 89%，而柴油只能降解 18%。此外，与石化柴油相比，生物柴油具有更好的润滑性能，将生物柴油添加到传统柴油燃料中后，燃料油的润滑性得到显著改善，生物柴油的添加量达到 1%，油品的润滑性可以提高 30%。我国餐饮业年产废油达 500 万吨以上，除部分被作为制备脂肪酸的工业原料进行利用，还有大量“地沟油”重新回流到餐饮市场，对消费者的健康构成危害。利用餐饮废油制备生物柴油，不但能充分利用资源变废为宝，而且能从源头上阻断地沟油回流到餐桌上。

## 6.1 国内外生物柴油发展状况

### 6.1.1 全球生物柴油产业状况

2006—2013 年间，全球生物柴油产量迅猛增长，年复合增长率超过 20%（见图 6-1）。全球生物柴油产油国主要集中在欧洲地区、美国、阿根廷、巴西等国，全球前十大生物柴油生产国产量之和占全球生物柴油总产量的 75%。2011 年世界生物柴油总产量约 2210 万吨，其中欧盟占 51%，南美地区（巴西为主）占 24%，亚洲占 13%。2013 年生物柴油产量，美国约 350 万吨，阿根廷 240 万吨左右，巴西 230 多万吨。

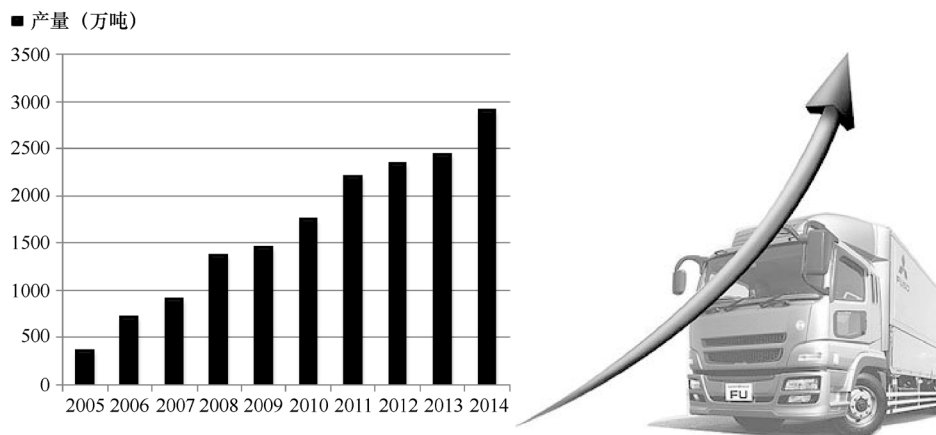


图 6-1 世界生物柴油产量

### 6.1.2 我国生物柴油发展概况

生物柴油是我国大力扶持的产业之一，我国十几年前就开始推进生物柴油的研发工



作。科技部在“八五”、“九五”、“十五”期间分别从开发能源作物、生物柴油生产、生物柴油车辆实验等层面支持我国可再生液体燃料的发展，国家进行了一系列生物能源领域的技术攻关，为我国生物柴油的发展奠定了技术基础。

2013年我国生物柴油总产能超过370万吨，产量达到100万~120万吨，同比增幅55%，其中年产5000吨以上的厂家超过40家。预计2017年我国生物柴油总产能将达到约400万吨，产量将达到120万吨，2012~2017年期间生物柴油产能年均增长率约为4.9%，产量年增长率将达到7.1%。

### 6.1.3 生物柴油标准

基于生物柴油的可再生性和环保性，为了生物石油产业规范发展，世界各国对生物柴油的应用达成共识，20世纪90年代，欧洲各国先后制定了生物柴油国家标准。1991年奥地利颁布了世界上第一个生物柴油国家标准，随后，捷克共和国、德国、法国、意大利、瑞典等国家也相继颁布了生物柴油国家标准。随着生物柴油油品质量的提高，欧盟生物柴油应用的比例在2011年已经达到5%，并提出到2020年生物燃料要占交通燃料的10%；马来西亚从2014年11月起，将生物柴油在柴油中的掺混比例从5%提高到7%；2014年7月开始，巴西生物柴油在柴油中的强制掺混比例已从5%提高到6%。

2005年开始生物产业在我国蓬勃发展，生物柴油产能从零发展到约300万吨的规模。在此后的两年间，我国生物柴油行业经历了从波峰到波谷的跌宕起伏。2007年时，国际原油价格上涨带动了整个食用油脂和工业油价格的大幅上涨，绝大多数生物柴油企业陆续关闭。另一方面，虽然国家对生物柴油持肯定态度，由于相关标准的缺乏，国家未能及时出台相关的扶持政策，在一定程度上制约了生物柴油健康有序的发展。由于缺乏国家统一标准，生物柴油不能加入到石油柴油中去，因此不可能进入主流销售渠道。大多数生物柴油被作为渔船、小型发电厂、工业窑炉的补充燃料。

2007年，我国发布了第一个生物柴油产品标准——《柴油机燃料调合用生物柴油（BD100）国家标准》（见表6-1），规范了我国生物柴油的质量指标，保证生物柴油品质合格。但由于没有调合燃料的标准，生物柴油在实际应用中不够规范，在燃料市场中没有正式的身份，国内生物柴油生产企业依旧处境尴尬。2011年2月1日，国家质检总局、国家标准委发布了B5标准（编号为GB/T 25199-2010），B5标准“规定了生物柴油和石油柴油调合的生物柴油调合燃料（B5）的术语和定义、分类和标记、要求和试验方法、检验规则及标志、包装、运输和储存及安全”。该标准界定了生物柴油掺混比例，明确了生物柴油不能直接使用，一般要和石化柴油进行一定比例的混配，两者进行调和时必须严格遵照标准进行，所谓的生物柴油调和燃料（B5），就是2%~5%（体积分数）的生物柴油与95%~98%（体积分数）的石油柴油的调合燃料，同时界定了在生物柴油生产和调和过程需要注意的事项和指标。该标准的颁布，为国内生物柴油进入市场打开了大门。

表 6-1 中华人民共和国柴油机燃料调合用生物柴油（BD100）技术要求和试验方法

项目		质量指标		试验方法
		S500	S50	
密度（20℃）/（kg/m³）		820~900		GB/T 2540
运动粘度（40℃）/（mm²/s）		1.9~6.0		GB/T 265
闪点（闭口）/℃		130		GB/T 261
冷滤点/℃		报告		SH/T 0248
硫含量（质量分数）/%	≤	0.05	0.005	SH/T 0689
10% 蒸余物残炭（质量分数）/%	≤	0.3		GB/T 17144
硫酸盐灰分（质量分数）/%	≤	0.02		GB/T 2433
水含量（质量分数）/%	≤	0.05		SH/T 0246
机械杂质		无		GB/T 511
铜片腐蚀（50℃，3h）/级	≤	1		GB/T 5096
十六烷值		49		GB/T 386
氧化安定性（110℃）/小时		6		EN 14112
酸值/（mgKOH/g）		0.8		GB/T 264
游离甘油含量（质量分数）/%	≤	0.02		ASTMD6584
总甘油含量（质量分数）/%	≤	0.24		ASTMD6584
90% 回收温度/℃	≤	360		GB/T 6536

随着国家生物柴油标准的颁布，地方标准也陆续出台。2013 年，云南省强制性地方标准《生物柴油调合燃料（B10）》和《生物柴油调合燃料（B20）》正式出台，云南地方标准提高了生物柴油的参混比例，同时，标准的出台意味着今后云南的生物柴油将可进入燃料油的销售渠道。业界专家表示，云南省制定的地方标准提高了生物柴油的掺混比例，给生物柴油进入市场铺平了道路，为生物柴油的利用提供了广阔的出路<sup>[1-6]</sup>。

6.2 生物柴油的生产和性能

生物柴油的生产主要以各种油脂为原料，植物油是目前制备生物柴油的主要原料。生产生物柴油的原料包括：（1）食用油如菜籽油、棕榈油、葵花籽油；（2）废油如地沟油；（3）动物的脂肪如牛油、猪油；（4）微藻油。不同的国家根据各国的实际情况，利用不同原料生产生物柴油。欧洲国家主要采用大豆油和菜籽油进行生物柴油生产；马来西亚和印度尼西亚利用椰子油和棕榈油进行生物柴油生产；印度和东南亚则广泛使用麻疯树油作为原料制备生物柴油。当前，利用微藻油生产生物柴油是国内外研究的热点，微藻生长周期短，产量高，利用海水作为天然培养基可以节约土地资源、降低种植成本；同时利用工业废水或地表水为培养基，进行大规模培养微藻，还能解决工业废水排放问题。因此，以微藻作为生物柴油原料具有极大潜质。

植物油具有相对分子质量大、黏度高的特点，作为发动机燃料使用时难以挥发、雾化。

1892年德国工程师鲁道夫（1858-1913）利用花生油作为发动机燃料进行尝试。然而试验过程中发现植物油不易雾化，燃烧不充分，易形成碳沉积，造成发动机结垢等问题。基于植物油的高黏度的问题，大量科研人员提出了一系列解决途径尝试将动植物油脂（甘油三酯分子的化学结构如图6-2所示）进行结构改造，将其转化为低黏度、高品质的生物柴油。

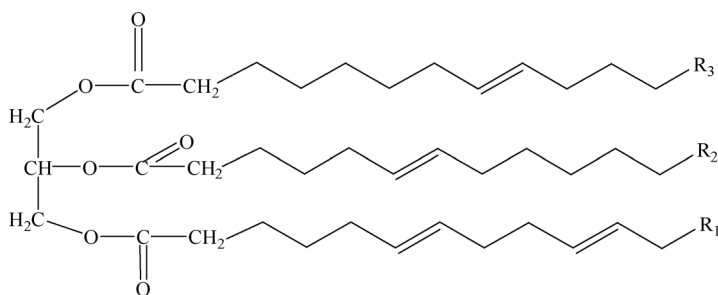


图 6-2 植物油分子结构

### 6.2.1 生物柴油的生产

目前，主要的生物柴油生产方法包括：直接混合稀释法，微乳液法，高温热裂解法和酯交换法。

#### 1. 直接混合稀释法

直接混合稀释法属于物理方法，将植物油与柴油按一定比例直接混合使用，以此降低植物油黏度，该方法工艺简单，在不改变原料结构的情况下，将植物油、柴油、降凝剂和添加剂按一定比例直接混合从而得到生物柴油。由于动植物油和柴油分子结构不同，含有大量不饱和键，容易被氧化发生聚合，这些聚合物不能充分燃烧而形成积碳，此方法获得的油脂黏度、闪点和酸值偏高，热值低，低温启动性差，在油脂使用过程中会雾化不良、燃烧不完全、喷嘴堵塞等问题，并对发动机造成损伤。

#### 2. 微乳液法

微乳液法也属于物理生产方法，微乳液法生产生物柴油是利用低黏度乳化剂（例如1~5元短链醇），将植物油稀释，降低其黏度，从而满足其作为燃料使用的要求。由于短链醇为低沸点成分，能使微乳化的植物油雾化性大大改善。但是，微乳化油的使用受到环境限制，因为环境温度的变化可能引发破乳现象。此外，发动机长期使用植物油乳化燃料会出现积碳、引擎积污、活塞环黏结或润滑油增稠等现象，使发动机不能正常工作从而限制了其广泛的使用。

#### 3. 高温热裂解法

高温热裂解法是将原料在高温条件下，通过催化剂的作用，使动植物油脂在空气或氮气中裂解，得到生物质燃料的工艺方法。高温条件使植物油裂解为短链碳氢化合物，由于碳链的断裂，油脂的相对分子质量减小，黏度也随之降低。高温下，油脂通常被热裂解生成烷烃、烯烃、二烯烃、环烷烃、烷基苯、芳族化合物等（见图6-3）。其中烷烃和烯烃组

分，约占产物总重量的 60 %，羧酸约占 9.6% ~ 16.1 %。利用硅铝分子筛在高温下对棕榈油和椰子油进行催化热裂解，转化率分别能达到 84 % 和 74 %。利用二氧化硅 - 氧化铝催化剂能获得煤油构成的脂肪烃，而分子筛则能将这些植物油转化为类似汽油的轻质成分。高温热裂解法对原料的要求不高，得到的产品与普通柴油性质相近，缺点是高温裂化的工艺流程比较复杂，需要投入大量能量，设备成本费用也比较高。另外，高温热裂解法制备的产品组分中生物柴油的含量不高，以生物汽油为主。

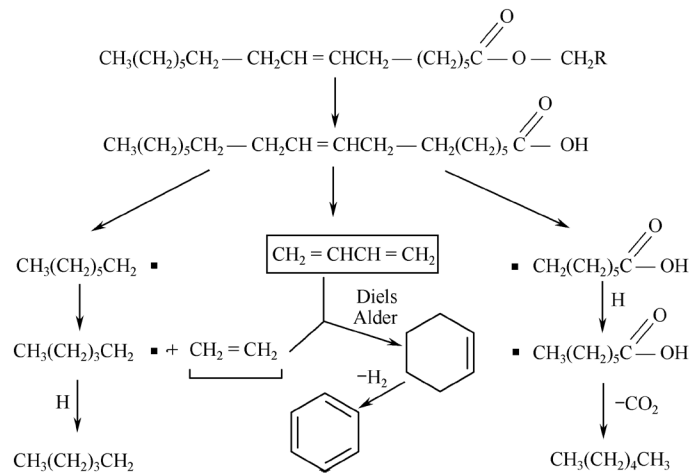


图 6-3 植物油的热裂解图

表 6-2 为菜籽油在不同温度下的裂解产物，可以看到，裂解产物以小于 C<sub>9</sub> 的汽油组分为主，C<sub>12</sub> ~ C<sub>18</sub> 柴油组分较少，产物中还有芳香族化合物、烯烃、不饱和酯。高温热裂化产物中往往还含有羧酸和其他的含氧化合物，这些成分会对发动机进行腐蚀，加之热裂解法反应温度较高、能耗大，所以该法并不适合生产生物柴油。

表 6-2 菜籽油在不同温度条件下裂解产物的组成

产物	反应温度 /℃						
	550	600	650	700	750	800	850
C <sub>1</sub> ±C <sub>4</sub>	10	18.6	28.2	38.7	35.1	45.1	66.1
C <sub>5</sub> ±C <sub>9</sub>	36	19.6	17.6	13.2	17.5	12.6	3.6
C <sub>10</sub> ±C <sub>14</sub>	3	3.5	3.5	2.7	1.7	1	0.3
C <sub>15</sub> ±C <sub>18</sub>	0.9	0.7	0.3	1.1	0.3	0.2	0.3
芳烃	5.2	2	2.7	3.9	7.2	11.6	8.9
C <sub>3:1</sub> ±C <sub>8:1</sub>	8.5	16.6	10.3	7.2	5.9	4.1	0.9
C <sub>9:1</sub> ±C <sub>16:1</sub>	2.3	3.2	3.4	2.3	0.9	0.5	0.3
饱和酯	2	1.2	1.6	2.4	3.7	3.1	2.6
CO	0.5	1.2	1.3	2.3	2.7	3.8	5.3
CO <sub>2</sub>	0.3	0.6	0.6	1.1	1.5	1.6	2.1
结炭	6.1	3.8	4.2	4.7	2.2	3.1	4.5
其他组分	25.2	29	25.3	20.4	21.3	13.3	5.1

#### 4. 酯交换法

目前，酯交换法是制备生物柴油最为广泛的生产方法，其原理是通过酰基转移作用将高黏度的动植物油脂（甘油三酯）转化成低黏度的脂肪酸甲酯，使得油脂的相对分子质量降低至原来的 1/3，黏度降低 8 倍，从而提高了燃料的挥发性。生产过程如图 6-4 所示，甘油三酯在催化作用下，与短链醇进行酯交换反应生成脂肪酸甲酯（即生物柴油）。酯交换反应中，使用的短链醇包括甲醇、乙醇、丙醇、丁醇和戊醇。由于甲醇成本低，极性、碳原子数少，常被作为酯交换反应的原料。采用酯交换法生产的脂肪酸甲酯类生物柴油工艺简单，工艺路线比较成熟，已经进行了大规模的工业生产。

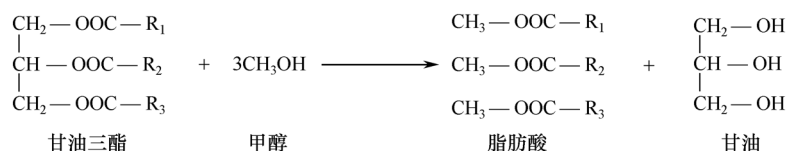


图 6-4 植物油酯交换转化为第一代生物柴油

酯交换反应由多步可逆反应构成。首先，甘油三酯与低级醇反应生成甘油二酯，接着，甘油二酯与醇反应生成甘油一酯，最后生成三个脂肪酸甲酯和副产物甘油。通过酯交换反应得到终产物为脂肪酸甲酯和副产品甘油。酯交换反应是可逆反应，反应参数如反应温度、压力、摩尔比能影响生物柴油的生成速率，此外催化剂也是决定反应进程的关键因素，依据所用催化剂的酸碱性，酯交换反应可分为酸催化的酯交换反应和碱催化的酯交换反应。采用酸催化剂或碱催化剂取决于原料油的性质，酸催化的酯交换反应对原料的要求低，但反应速度相对较慢；碱催化的酯交换反应速度快，但对原料中游离脂肪酸的含量有严格要求。具体来说：酸催化的酯交换反应，一般以硫酸、盐酸或磷酸作为催化剂。将催化剂预先溶解到甲醇中，然后将植物油投入到反应器中与预先混合好的甲醇—催化剂混合物反应。醇、植物油的摩尔比是影响反应速度的主要因素之一。由于酯交换反应是可逆反应，加入过量的醇，有利反应的平衡点向生成脂肪酸甲酯的方向移动，如图 6-5 所示。

对于碱催化酯交换反应，由于其反应进行的速度快，但对反应原料油的要求严格。碱会与游离脂肪酸发生反应，消耗催化剂，降低催化剂的活性，因此要求原料油的酸值小于 1，且含水量低于 5 %。如果原料酸值大于 1，催化剂氢氧化钠或氢氧化钾，将与原料中游离脂肪酸反应生成皂化物，皂化物导致反应体系中出现大量泡沫，增加体系黏度，最终使产物生物柴油和副产物甘油难以分离。

由于传统的均相酸碱催化法都存在腐蚀性和环境污染性的问题，并且催化剂难以回收利用，环境污染严重，产物后处理复杂，而非均相催化剂容易回收，可重复使用，产品无须水洗，无三废排放，因而新的酯交换技术应运而生。



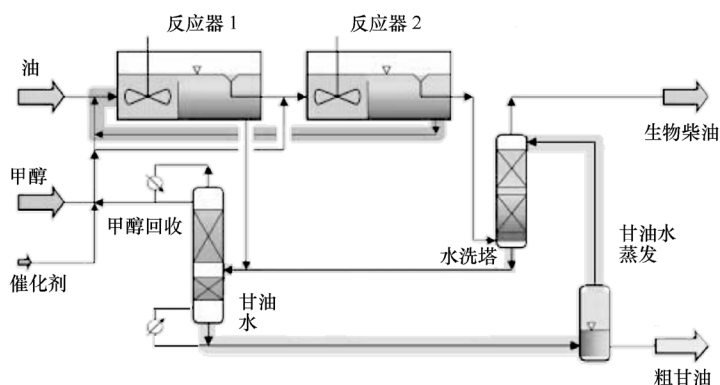


图 6-5 生物柴油生产工艺

### (1) 酶催化酯交换

动物胰脏、微生物中富含脂肪酶，脂肪酶具有催化油脂与甲醇进行酯交换的能力。以酶为催化剂，使动、植物油脂与甲醇发生酯交换反应，得到目标产物脂肪酸甲酯。酶催化的酯交换反应是应用生物技术制备生物柴油的重要途径，目前对生物酶催化剂的研究主要集中在脂肪酶的固定化和提高酶活方面，未固定化的脂肪酶催化酯交换反应的产率能达到 62%，用硅藻土固定化的脂肪酶产率能达到 71%。酶法合成生物柴油具有反应条件温和、无污染物排放的优点，但面临的主要问题是转化率低，一般仅为 40%~60%。此外，反应原料（低级醇）能使脂肪酶中毒，由于游离脂肪酶催化活性单一，易造成分散不均匀、容易失活，直接导致了酶的使用寿命短。成本和反应效率限制了脂肪酶规模化应用于生物柴油生产中。对于酶催化法而言，通过诱变及基因工程技术构建高活性、高耐受性的脂肪酶是未来酶催化技术能推广使用的关键，此外，通过固定化酶技术提高脂肪酶稳定性、延长酶的使用寿命也将是研究的重点方向<sup>[7]</sup>。

### (2) 超临界制备法

植物油和甲醇可以在超临界条件下直接进行酯交换反应和酯化反应生产生物柴油，利用超临界甲醇与植物油进行酯交换反应制备生物柴油是一种绿色新工艺。与传统方法相比，超临界法一般不需要催化剂。在超临界状态下，甲醇的溶解性很高，甲醇能够与植物油充分互溶，改善了传质效果，在较短的时间内，即可完成转酯反应。超临界甲酯化过程不需要催化剂、反应时间短、产物的后续纯化简单。河南科技大学李玉柱以葵花籽油为原料，利用超临界酯交换法制取生物柴油，并研究葵花籽油超临界酯交换的反应动力学。武汉化工学院肖建华，以大豆油为原料，用超临界法对大豆油进行转酯化反应，该反应在无催化剂的条件下进行，反应条件为：油醇摩尔比为 1:50，反应温度 320℃，反应压力 12~18 MPa，经过 15 min，转化率达到 93%。超临界法制备生物柴油，工艺简单，后处理简单，反应时间短，产率高，但醇消耗量大，较高的反应温度和反应压力都对设备提出了较高要求，放大到工业化生产中非常困难。

### (3) 固体酸、固体碱催化剂法

固体酸催化功能来源于固体表面上存在的具有催化活性的酸性部位—B 酸（Bronsted）和 L 酸（Lewis）活性中心，固体酸催化剂同时具有催化酯化反应和酯交换反应的能力，其催化酯化反应效果可以达到液体强酸的催化水平。固体碱催化剂则同时具有 B 碱和 L

碱活性中心，在催化过程中具有提供电子的能力。固体碱能催化酯交换反应、异构化反应、氧化还原反应、加成与缩合反应一系列反应。固体酸或碱催化剂具有反应活性高、对反应设备腐蚀性小、可循环使用等特点，受到广泛关注和研究<sup>[8,9]</sup>。需要注意的是，当原料中含有大量游离脂肪酸和水分时，固体碱催化剂会发生溶解现象，导致催化剂损失及产物被污染。南开大学华芳以氢氧化钡作为催化剂，催化蓖麻油进行酯交换反应。在优化的反应条件下：油醇摩尔比为 1:6，反应时间 20 min，生物柴油转化达 98%。石油大学李为民采用共沉淀法制备了 Mg-Al 催化剂，催化菜籽油进行酯交换反应，通过正交实验优化得到最佳酯化反应条件为：催化剂加入量 2%，油醇摩尔比 1:6、反应温度 65℃、反应时间 3 h，在该条件下脂肪酸甲酯转化率达 95.7 %。

### 6.2.2 生物柴油的性能

生物柴油的评价指标包括其黏度、密度、十六烷值、浊点、闪点、酸价、铜腐蚀和热值等。黏度是评价生物柴油品质的最重要参数之一。生物柴油的黏度越低，就越容易雾化，从而利于其充分燃烧。植物油的黏度值在 27.2 和 53.6 mm<sup>2</sup>/s 之间，而它们对应的脂肪酸甲酯黏度在 3.6 和 4.6 mm<sup>2</sup>/s 之间。植物油通过酯交换过程黏度可显著降低，甘油三酯转化成脂肪酸甲酯后，相对分子质量仅为原甘油三酯的三分之一。但与 2 号柴油相比，植物油甲酯黏度依然偏高。此外，生物柴油比常规柴油具有更高的浊点和倾点。

总体而言，生物柴油具备以下优点：（1）具有良好的润滑性能，其润滑性能比石化柴油高出 66%，长期使用能减少发动机磨损；（2）由于不含芳香族化合物和硫化物，生物柴油作为燃料燃烧时，能显著降低有害气体的排放；（3）生物柴油燃料容易生物降解；（4）生物柴油具有较高的闪点，有更高的运输安全性。

第一代生物柴油脂肪酸甲酯虽有诸多优良品质，它在使用过程中还存在很多问题：（1）稳定性差，容易堵塞滤器；（2）与石化柴油相比，生物柴油冷启动困难，热值较低；（3）强吸水性，水的存在加速了微生物菌落的滋生，造成系统堵塞；（4）黏度较高，难以充分雾化、燃烧。甲酯化途径虽然降低了植物油的黏度，但是没有从根本上消去植物油中的氧原子和植物油中的双键，其安定性还有待提高。

## 6.3 第二代生物柴油——绿色柴油的生产与性能

甲酯化是第一代生物柴油的主要工艺路线，即利用甲醇与植物油进行转酯化反应，产物脂肪酸甲酯（脂肪酸甲酯中依旧含有氧原子和不饱和双键）。绿色柴油（第二代生物柴油）通过加氢裂解反应，消除植物油中的氧、不饱和键，从而得到烷烃产品。为了克服第一代生物柴油结构上的弊端，氢化裂解技术被应用于绿色柴油制备过程中。

加氢处理技术发展于 20 世纪 50 年代，是石油化工行业常用的工艺技术，它用于提高原油加工深度、改善油品质量，目前该技术是我国生产汽油最主要的手段。基于催化加氢过程，通过加氢脱氧、异构化等反应将动植物油脂转化为类似柴油组分的烷烃，形成了绿色柴油制备技术。在氢化裂解过程中，甘油三酯的三碳“骨架”转化为丙烷，植物油中的

氧，以一氧化碳、二氧化碳或水的形式释放、除去，双键在氢化过程中被氢气饱和，最终得到的产物为饱和烷烃。通过氢化裂解过程，植物油中的不饱和键以及含氧基团被消除，得到的产物与石化柴油相似，因此绿色柴油克服了第一代生物柴油存在的问题。

### 6.3.1 绿色柴油的生产

在生产上，利用酯交换法生产第一代生物柴油，对原料有较高的要求，因此不能对成分复杂的油料进行直接利用，须先对原料油进行预处理，将其中游离的脂肪酸及水分除掉，工艺复杂，加大了生产成本。另一方面，得到的脂肪酸甲酯的品质会受原料油结构限制，在生产过程中，原料油的成分对产物的质量有直接影响，比如以不饱和脂肪酸含量较高的植物油作为原料，其制备出的生物柴油十六烷值就可能达不到标准。例如，利用油桐和乌桕油脂制备的生物柴油十六烷值分别仅为 37 和 43（国家标准要求生物柴油十六烷值大于 49）。

第二代生物柴油生产途径，对原料的要求不严格，原料中脂肪酸含量不会影响反应的进行，产物品质受原料油组分变化的影响较小。从产物结构上看，石化油以烷烃为主，而第一代生物柴油属于酯类，不管是黏度、热值、密度和石化油还是存在一定劣势，尤其是其含氧量高；绿色柴油以  $C_{12} \sim C_{22}$  的烷烃为主，在化学结构上与柴油基本相同，具有与柴油相近的黏度和热值，相当的氧化安定性，且部分性能甚至超越了石化油，如高十六烷值、低芳香族含量、低硫含量<sup>[10]</sup>。所以不管是从生产工艺还是产品性能而言，开发绿色柴油都具有一定的潜力和优势。

植物油和动物脂肪的高氧含量是导致脂肪酸甲酯的热稳定性和化学稳定性差的根本原因，要提高油脂的稳定性，产物中氧含量必须要减少。第二代生物柴油的生产技术是在石化行业加氢精制的基础上发展起来的，石油通过加氢精制过程，可以将石油馏分中不饱和的烯烃、芳烃等进行加氢饱和，同时可以将馏分中含有的 S、N、O 等非烃类组分进行加氢脱除，从而提升油料品质。加氢技术能消除动植物油脂中的氧，提高油脂的稳定性能，近年来，加氢技术在新二代生物柴油制备技术中得到了进一步发展和应用。

第二代生物柴油工艺与第一代的原料完全相同，主要包括动、植物油脂或脂肪酸等。主要采用两步法工艺，即先对油脂加氢脱氧获得正构烷烃，再正构烷烃进行临氢异构<sup>[11,12]</sup>。芬兰耐斯特石油公司于 2003 年提出了采用两步法合成生物柴油（NExBTL 工艺）在 2007 年首次投产，该工艺以油脂为原料，先利用 Ni-Mo 或 Co-Mo 催化剂将油脂加氢脱氧，再通过贵金属催化剂实现烷烃异构化，最终得到高品质的生物柴油，并实现量产。第二代生物柴油生产工艺包括加氢脱氧和临氢异构两段：

第一段为加氢脱氧段，常采用氧化铝或氧化硅负载的 Co-Mo 或 Ni-Mo 催化剂，在反应温度  $200^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ ，压力  $2 \sim 8\text{MPa}$ ，氢气与原料（动植物油脂）发生加氢脱氧反应；但经过不同的反应途径得到的产物有所不同，加氢脱水反应得到与原来脂肪酸碳数一致的烷烃；而脱羧或脱羰反应得到的是少一个碳的烷烃。这些烷烃均属于碳链长度为  $12 \sim 22$  个碳原子的正构烷烃。植物油经加氢脱氧段得到了正构烷烃，虽然正构烷烃具有很高的十六烷值，但也存在在低温条件下流动性差、凝点和冷滤点高的问题，在实际使用时会受

到温度的限制。尤其在寒冷地区，柴油需要具备较低凝固点，因此还需对正构烷烃进行结构改性。直链的烷烃经过临氢异构化后可以转变为支链的异构的烷烃，这种结构的转变能满足生物柴油的低温性能。

第二段为临氢异构段，目的是将第一段得到的正构烷烃异构化。贵金属（如 Pd、Pt）能够表现出异构催化性能，应用于直链烷烃临氢异构工艺的催化剂通常为负载有贵金属加氢催化剂。异构段中氢气和反应原料采用逆流操作方式，反应温度为  $220^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ ，压力  $2 \sim 13\text{MPa}$ 。通过加氢脱氧再经过临氢异构，该工艺增加烷烃组分中支链烷烃的含量，有效改善了产物的性能参数，得到的生物柴油组分不但具有较高的十六烷值，而且具有优良的低温流动性，其使用的范围得以拓宽。

总体而言，反应包括加氢脱氧和异构化两大步骤，在加氢脱氧过程中，动植物油脂分子发生断裂，生成丙烷和直链烷烃，获得的直链烷烃具有很高的十六烷值，但同时存在凝点和冷滤点高的弊端；直链的烷烃再经过异构化反应生成含有支链的异构烷烃，从而降低产品的凝点。加氢法使得油品的氧化安定性、十六烷值大幅提高，将高黏度的动植物油脂转化成低黏度的碳氢化合物。

通过对油料进行加氢脱氧反应和临氢异构化反应最终得到与石化柴油非常类似的烷烃组分。此外，用加氢法制备生物柴油工序简单，油脂的转化率高，废液废气排放少，具有广阔的发展前景。

在利用加氢法制备生物柴油过程中，催化剂的改良是发展第二代生物柴油技术的关键（第二代生物柴油生产流程见图 6-6）。氢化裂化所用催化剂为双功能催化剂，由活性金属组分和酸性载体组成。其活性组分一般为过渡金属元素，主要包括Ⅷ族的 Co、Pd、Ni、Fe、Pt 和 VIB 族的 Mo、W。这些过渡金属活性组分单独使用时催化活性并不高，当两种过渡金属同时存在时则相互协同，显示出较高的催化活性。因此，加氢裂化催化剂通常是由Ⅷ族金属和 VIB 族金属二元活性组分所组成，如 CoMo、NiW、NiMo 和 CoW 体系等。

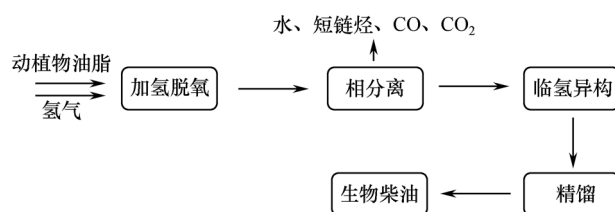


图 6-6 第二代生物柴油生产流程

双功能催化剂中，其载体一方面用于支持金属活性组分，使活性组分分散在载体表面上，提高单位质量活性组分的催化效率。另一方面，载体也作为活性成分，参与氢化裂解反应。载体的孔径、酸强度、比表面积对反应产物的分布有重要的影响。载体包括三大类：（1）非晶态氧化物，比如氧化铝、氧化铝-氧化硅混合物，它们酸性较弱，裂解能力适中，适合将植物油裂解为柴油组分；（2）沸石分子筛，如 ZSM-5，ZSM-22，Y、 $\beta$  型分子筛，以及磷酸硅铝分子筛，SAPO-11，SAPO-31，SAPO-41，它们具有强酸性位点，裂解能力强，通常适用于将植物油裂解为汽油组分；（3）介孔材料，MCM-41，



AlMCM-41，它们常用于长链烃的异构化。因此，在选择制备高十六烷值的生物柴油时，常以二氧化硅和氧化铝为催化剂载体组成。由于分子筛酸性较强，裂解能力较强，以植物油为原料，采用分子筛作为催化剂，其主要产物为汽油组分，柴油组分则较少；由于酸性适中，而以氧化铝负载的双功能催化剂，催化剂裂解能力相对较弱，裂解产物则以柴油组分为主。因此，需要根据产物的需求，对催化剂进行筛选和设计，同时对反应参数进行优化。

典型的催化剂，如氧化铝负载的 Ni-Mo 催化剂、Co-Mo 催化剂都能催化该反应。一般而言，硫化态的催化剂较还原态的催化剂具有更强的催化活性。为了保持催化剂的活性，必须维持催化剂以硫化态存在，但是原料植物油中含硫量低，因此需要向原料油中加入一定含量的硫化物，以维持催化剂的活性。Gusmao 和 Da Rocha Filho 研究了硫化态催化剂对植物油裂解的影响。以硫化 Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Ni/SiO<sub>2</sub> 为催化剂，反应氢分压为 1 ~ 20MPa，发现在低于 200℃ 反应温度下，只发生加氢反应，植物油双键被饱和，生成相应的饱和甘油三酯，即甘油三硬脂酸酯。当反应温度高于 290℃ 时，甘油三酯开始分解。Da Rocha Filho 等人研究了以 Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为催化剂，以豆油为原料，进行加氢裂解反应，在温度 360℃ 和压力 14 MPa，反应时间 2 小时条件下，主要产物是正构烷烃（66 ~ 76wt.%），气态产物和水的含量分别为 9 ~ 13wt.% 和 5wt.%。其中，气态产物中主要成分是二氧化碳（80wt.%），其余部分为 CO 和 C<sub>1</sub> ~ C<sub>4</sub> 短链烃类。烷烃反应产物中，以正构烷烃为主，环烷烃占 13wt.%，芳烃占 4wt.%。Pavel Šimáček 以葵花油为原料，利用商品化的双功能催化剂对其进行氢化裂解，反应温度为 420℃，反应压力为 18MPa，得到倾点为 -8℃，凝点为 -15℃ 的产物，其性能和组分与石化柴油相似，且得到产物的十六烷值为 65，较石化柴油高。

### 6.3.2 绿色柴油的性能

加氢技术从结构上解决了生物柴油稳定性、黏度的问题，因此正逐步应用于高品质油品的生产中，如生物航空燃油即采用该途径进行制备。与第一代生物柴油脂肪酸甲酯相比，二者在生产原料结构上没有区别，但第二代生物柴油在分子结构与石油基燃料更为接近，部分性能上甚至超越石化柴油，可在目前的储罐、管道、卡车、泵和汽车中使用，而无需对基础设施进行任何更改，在产品加工和使用方面也比第一代方便，因此深受石油炼制企业的欢迎，并且已经开始进行大规模的工业化推广。

第二代生物柴油的优势主要包括：（1）与石化柴油相比，排放量更低，最多可降低 80%；（2）不需要更改燃料基础设施或车辆技术；（3）与化石燃料以任何百分比使用，第一代生物柴油（脂肪酸甲酯）混合比例低于 20%；（4）由于不存在不饱和键以及氧原子，产物的性质稳定，难以氧化；（5）加氢异构过程使产品具有优异的冷流特性，并适用于低温环境；（6）与第一代生物柴油相比，具有更高的单位体积能量含量。

表 6-3 所示为石化柴油、生物柴油及第二代生物柴油性能的比较。



表 6-3 石化柴油、生物柴油、第二代生物柴油性能比较

对比项目	石化柴油	生物柴油	第二代生物柴油
15℃ 密度 /kg/m <sup>3</sup>	835	885	775 ~ 785
40℃黏度 mm <sup>2</sup> /s	3.5	4.5	2.5 ~ 3.5
十六烷值	53	51	80 ~ 99
馏程 /℃	180 ~ 360	350 ~ 370	180 ~ 320
浊点 /℃	-5	-5	-5 ~ -25
低热值 /MJ/kg	42.7	37.5	44.0
芳香烃含量 /wt-%	30	0	0
氧含量 /wt-%	0	11	0
硫含量 /mg/kg	< 10	< 10	< 10
稳定性	稳定	不稳定	稳定

第二代生物柴油的生产是在石化柴油加氢精制工艺基础上发展起来的，采用与第一代完全相同的原料，加氢催化法制备的生物柴油十六烷值大幅度提高，生产工艺大大简化，生物柴油技术的不断发展将为低成本、高质量生物柴油推向市场提供保障。

6.4 我国生物柴油产业的挑战和展望

目前生物柴油产业发展的整体情况不容乐观。2006 ~ 2007 年是我国生物柴油发展的高峰期，全国建成生物柴油企业超过 300 家。目前，我国生物柴油企业发展举步维艰，生物柴油规模化和商业化进程也比较艰难，能够全线生产的厂家不足 30 家。目前我国生物柴油生产工艺已较为成熟，相应的调和燃料国家标准也已出台，生物柴油产业发展之所以裹足不前，原因主要有两点：上游无原料，下游无销路。

目前，我国主要利用地沟油进行生物柴油的生产，我国年产地沟油达 500 万吨以上，除部分被作为化工原料制备脂肪酸进行利用，还有部分地沟油被分离、纯化而重新流入餐饮市场。近年来，随生物柴油产业的迅速发展，各地地沟油价格猛涨，地沟油资源争夺激烈，生产成本超出了生物柴油生产企业的承受能力，造成生物柴油生产原料短缺。而其他原材料如黄连木、油桐、棉籽、麻疯树、光皮树等油料植物的油脂生产周期长、价格高，无法满足生物柴油的生产，甚至出现原料价格高于成品油价格的情况，原料价格与产品价格的倒挂使生产企业无法盈利。此外，由于原料油料作物产量有限，且原料自身具备较强的经济价值，原料价格甚至高于成品油价格（见表 6-4），使得生物柴油的盈利空间不足。

表 6-4 2015 年 6 ~ 7 月部分油品价格

油 品	价格（元 / 吨）	油 品	价格（元 / 吨）
柴油	5900~6000	棕榈油	7150~7200
生物柴油	6800~7200	菜籽油	7650~8050
地沟油	4000~4500	棉籽油	5900~6400
桐油	14000~16000		

目前,大多数城市没有加油站供应生物柴油,生物柴油难以进入车用油销售市场。生物柴油在销售环节“流通不畅”的现象十分突出。由于生物柴油企业没有车用燃料油经销资质,而中石化等传统油企处于燃料油市场销售的垄断地位,生物柴油企业只能将生物柴油卖给中石化、中石油等企业,却受到“石油巨头”冷落,相关法律规定也成一纸空文。无法进入汽车用油市场,企业只能通过自建销售渠道,将生物柴油零散卖给渔船、运输车队,难以实现规模效益。2014年7月底,因生物柴油的销路问题,盈鼎公司将中石化、中石化云南石油分公司告上法庭,要求将盈鼎公司生产的生物柴油纳入其燃料销售体系,引发各界广泛关注和思考。依据可再生能源法规定,石油销售企业应将符合国家标准生物液体燃料纳入其销售体系,但占据云南成品油大部分销售市场的中石化,却拒售盈鼎公司生产的符合标准的生物柴油。如何推广应用地区、建立销售网络和配套保障措施等内容是拓展生物柴油销售市场的关键问题。

针对上述问题,有效的解决途径包括:严格地沟油管理,同时推动科研,选育适应盐碱地、沙荒地等条件的非粮能源作物品种,形成生物柴油作物原料产区。此外,大力开发微藻类油脂,探索开发非食用草本油料和微藻资源,逐步建成适合我国国情的可持续原料供应保障体系,以解决原料瓶颈问题。

生物柴油行业目前属于政策主导型行业,在生物柴油发展过程中,需政府大力扶持。实际上,从技术以及能源需求上我国生物柴油产业快速发展条件已具备,当前亟待加快生物柴油普及。虽然国家出台了生物柴油调和燃料(B5)标准,为生物柴油市场化推广奠定了基础,但是终端销售还是不通畅。同时,国家仍然需要政府给予一定的政策支持,税收优惠、质量体系标准的跟进等,逐渐培育和丰富生物柴油产业链,促进形成良好的投资氛围,促进整个生物柴油行业健康、快速的发展。

## 参考文献

- [1] 张春化, 吴占文, 边耀璋等. 生物柴油性能标准分析及建立健全标准体系的建议 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 298-303.
- [2] 亢淑娟. 地沟油生物柴油和酸化油生物柴油降粘及发动机台架试验研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2009.
- [3] 蔺建民, 张永光. 生物柴油产品标准的修订 [J]. 石油商技, 2013, 31(3): 50-58.
- [4] 耿莉敏. 生物柴油 / 柴油混合燃料的理化性能分析与喷雾特性改善 [D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [5] 刘昌. 生物柴油发动机的性能及燃烧特性试验研究 [D]. 南昌大学, 2011.
- [6] 袁银南, 江清阳, 孙平等. 柴油机燃用生物柴油的排放特性研究 [J]. 内燃机学报, 2003, 21(6): 423-427.
- [7] 高静, 王芳, 谭天伟等. 固定化脂肪酶催化废油合成生物柴油 [J]. 化工学报, 2005, 56(9): 1727-1730.
- [8] 李荣. 固体碱催化酯交换反应制备生物柴油工艺流程模拟 [D]. 太原理工大学, 2014.
- [9] 刘亚录, 朱运培, 袁忠勇等. 用于制备生物柴油的固体酸催化剂的研究进展 [J]. 石油学报 (石油加工), 2015, (3): 627-642.
- [10] 王利兵, 于海燕, 贺晓辉等. 生物柴油树种油脂脂肪酸组成对燃料特性的影响 [J]. 燃料化学学报, 2012, 40(4): 397-404.
- [11] 左华亮, 刘琪英, 王铁军等. 负载的 Ni 催化剂上植物油脂加氢脱氧制备第二代生物柴油 [J]. 燃料化学学报, 2012, 40(9): 1067-1073.
- [12] 翟西平, 殷长龙, 刘晨光等. 油脂加氢制备第二代生物柴油的研究进展 [J]. 石油化工, 2011, 40(12): 1364-1369.

第 7 章

生物燃料乙醇



所谓燃料乙醇是指按国标 GB18350-2001 质量标准，通过专用生产设备、特定脱水工艺，生产出乙醇含量在 99.2%（V/V）以上的无水乙醇。2000 年，中石化石油化工科学研究院等单位对车用乙醇汽油进行了系统研究，研究结果表明，在我国推广车用乙醇是可行的。

发展燃料乙醇的意义主要有以下几点：

（1）能源安全方面：燃料乙醇是石油燃料的理想替代品，也是现阶段应用最为广泛的可再生液体燃料，燃料乙醇的推广对降低原油进口依存起到重要作用。

（2）环保层面：使用燃料乙醇是减少温室气体排放的重要途径，使用乙醇汽油可有效减少雾霾。监测数据显示，以北京为例，其 PM2.5 来源中机动车尾气占比达到了 31.1%。第五届全美乙醇年会发布研究报告《乙醇汽油对空气质量影响》表明，燃料乙醇对可实现汽车尾气中 PM2.5 粒子减排的作用，在普通汽油中加入 10% 燃料乙醇可减少机动车细颗粒物排放 36%。燃料乙醇可大幅减少机动车有害物的排放，有助于空气质量改善，随着它的推广，可以大量节省大中城市治理空气污染的费用。

（3）经济层面：提高农民收入，减少环保投入。燃料乙醇的开发提供了利用农产品及农、林废弃物的途径，通过发展燃料乙醇产业，农民可通过种植相关作物得到补贴、增加收入，对提高农民的生活水平起到积极作用。

燃料乙醇按一定比例加入汽油中，除了作为油料替代品外，燃料乙醇还具有许多优良的物理和化学特性，可改良油品质量（我国燃油乙醇标准如表 7-1 所示）。

表 7-1 变性燃料乙醇国家标准 GB 18350 -2001 理化规定值简表

项目	单位	中国	美国	巴西	
				无水乙醇	含水乙醇
外观	（肉眼观察）	清澈透明、无肉眼可见的悬浮物和沉淀物		清澈	
颜色				橙色 <sup>①</sup>	无色至淡黄色 <sup>①</sup>
变性剂	%（V/V）	1.96 ～ 4.76			
乙醇	%（V/V）≥	92.1	92.1	99.3, 99.3 <sup>③</sup>	92.6 ～ 93.8 <sup>②⑤</sup> ， 92.6 <sup>③</sup>
甲醇	%（V/V）≤	0.5	0.5		
水分		0.8	1.0		
实际胶质	mg/L ≤	50.0	50.0		
无机氮（以 Cl <sup>-</sup> 计）		32	40		
酸度（以乙酸计）		56	0.007 <sup>④</sup>	30	30
电导率	μ S/m ≤			500	500
密度（20℃）	kg/m3			≤ 791.5	807.6 ～ 811.0 <sup>⑤</sup>
蒸发残渣 <sup>⑤</sup>	mg/100L ≤				5
碳氢化合物 <sup>⑤⑥</sup>	%（V/V）			3.0	3.0
铜	mg/L ≤	0.08	0.1 <sup>⑦</sup>	0.07 <sup>⑦⑧</sup>	
pH 值		6.5 ～ 9.0			6.0 ～ 8.0

注：①颜色添加剂为 15mL/m<sup>3</sup> Sudan Red(Orange)；②单位为 %（质量分数）；③对非发酵工艺生产的乙醇的要求；④单位为 %（质量分数）；⑤对乙醇进口和分销的限制，对生产商不作要求；⑥为生产商进口的无水乙醇中允许 3.0%（体积分数）的碳氢化合物；⑦单位为 mg/kg；⑧仅在怀疑被污染时测定。

辛烷值是评价燃料抗爆性能好坏的重要指标之一，同时也是评价车用汽油规格的首要指标。油品的辛烷值越高，其抗爆性就越好，发动机就可以用更高的压缩比。汽油的辛烷值越高，则汽车制造厂可随之提高发动机的压缩比，这样既可提高发动机功率，增加行车里程数，又可节约燃料，对提高汽油的动力经济性能有重要意义。甲基叔丁基醚（MTBE），是一种无色、透明、高辛烷值的液体（具有醚样气味，是生产无铅、高辛烷值汽油的理想调合组分，作为汽油添加剂在世界普遍使用），可作为汽油高辛烷值添加剂和抗爆剂。

燃料乙醇的增氧效果比 MTBE 高一倍。乙醇中氧原子含量高达 34.7%，汽油中勾兑乙醇可以缓解汽油在油缸内燃烧时供氧不足的问题。在汽油中勾兑 7.7% 乙醇，汽油中氧含量可达到 2.7%；如勾兑 10% 乙醇，则氧含量可以达到 3.5%。按规定比例加入乙醇后，并不会影响燃料的性能，反而促进汽油充分燃烧，减少有害气体排放。美国汽车 / 油料（AQIRP）的研究报告表明：使用含 6% 乙醇的汽油，与常规汽油相比，NO<sub>x</sub> 排放减少 7% ~ 16%，CO 排放减少 21% ~ 28%，有毒气体排放则降低 9% ~ 32%。

目前，车用燃料乙醇的使用包括两种方式：其一将无水乙醇与汽油进行混合，得到乙醇汽油，乙醇在混合物中的比例最高可达 25%。在使用乙醇汽油时，汽车发动机无需改动；其二是直接以无水乙醇作为汽车燃料，这时汽车必需配备使用专门设计的具有高压压缩比的发动机。

燃料乙醇虽然具有洁净的特点，但也存在一些不足之处：（1）乙醇在燃烧过程中会发生氧化产生乙酸，乙酸具有一定腐蚀性，对汽车金属特别是铜有腐蚀作用。测试试验表明，当汽油中乙醇的含量低于 10% 时，对金属基本没有腐蚀，但乙醇含量超过 15% 时，须加入有效的腐蚀抑制剂。（2）乙醇是一种优良溶剂，易对汽车的密封橡胶及有机材料产生轻微的腐蚀、溶胀作用。（3）乙醇易于吸水，车用乙醇汽油的含水量超过标准指标后，容易发生液相分离。

国内外实践证明，合理选择汽油标号，并按要求进行保养、清洗，保持油路清洁，使用车用乙醇汽油与无铅汽油相比，发动机的动力性无显著差别，油耗大体持平。

## 7.1 国内外燃料乙醇的发展状况

### 7.1.1 国外燃料乙醇的概况

早在 20 世纪 30 年代，燃料乙醇就被开发作为车用燃料。石油危机加速了能耗大国替代能源的开发，20 世纪 70 年代，巴西和美国率先推行燃料乙醇发展计划，加拿大、法国、西班牙和瑞典纷纷跟进，形成了广阔的应用市场。近年来随着经济的高速发展，能源需求日益增长，石油供应日趋紧张，燃料乙醇具有清洁、环保及可再生的优点，受到世界各国的普遍关注。

能源基金会在《世界主要国家生物液体燃料产业政策》研究报告中指出，世界燃料乙



醇主要产自北美、南美地区。从市场份额来看，美国是燃料乙醇生产的头号大国，巴西次之。2013 年，美国燃料乙醇产量占世界产量的一半，达到 56.77%，巴西占 26.75%，欧盟占 5.85%，中国占 2.97%，印度占 2.33%。

美国、巴西是目前世界上燃料乙醇产业体系发展最为成熟的国家，美国燃料乙醇规模化生产始于上世纪 90 年代，生产原料主要是粮食，其中玉米占 90%，高粱等其他原料占 10%。据经合组织发布的《农业展望 2007-2016》预测，2016 年美国将有 1.1 亿吨玉米被用于燃料乙醇生产，消耗的玉米将占美国全年产量的 32%，从客观上，玉米的大量消耗也拉抬了国际粮食的价格，加重了粮食进口国的负担。

美国燃料乙醇的发展经历了漫长的过程。1908 年，美国出现了世界上第一台纯乙醇汽车；1930 年，乙醇汽油在美国内布拉斯加州地区面市；1979 年，美国出于能源安全和环境的考虑，建立了联邦政府“乙醇发展计划”，开始发展生物乙醇。20 世纪 80 年代中期，随着石油价格暴跌，玉米大幅减产，生物燃料发展陷入低谷。1990 年，国会通过《清洁空气法修正案》规定，要求美国一氧化碳超标地区强制使用 10% 的乙醇混合汽油。2007 年，美国《能源独立及安全法案》通过，该法案规定了燃料乙醇的强制使用标准，要求 2015 年后美国一半以上的新车需使用含 85% 乙醇的混合汽油。从 2000 年到 2015 年，美国生物燃料增长迅猛，燃料乙醇产量超过巴西，成为全球最大生产国。

巴西是燃料乙醇的第二大生产国，巴西自然条件优越，甘蔗资源丰富，其燃料乙醇生产的原料主要是甘蔗，主要发展以甘蔗、糖蜜、木薯、玉米为原料生产燃料乙醇。巴西从 20 世纪 20 年代开始使用乙醇混配汽油，自本世纪初燃料乙醇再次进入快速发展期，巴西的乙醇产品中普通乙醇占 2/3，燃料乙醇占 1/3，是世界上唯一不使用纯汽油作为汽车燃料的国家。

### 7.1.2 我国燃料乙醇的发展状况

我国启动燃料乙醇项目的初衷，一方面考虑高涨的国际油价，急需找到替代能源；另一方面考虑消化陈化粮，建设了河南天冠、吉林燃料乙醇、黑龙江华润酒精、安徽丰原四家总产能为 102 万吨的示范燃料乙醇企业，根据《生物质能发展“十二五”规划》和《可再生能源中长期发展规划》，我国生物燃料乙醇利用规模在 2020 年将达到 1000 万吨。

我国燃料乙醇产业起步仅十余年，但发展迅速，最初我国用陈化的玉米、小麦等作物作为燃料乙醇生产原料，为当时陈化粮的消化提供巨大的市场，但随着燃料乙醇的生产规模扩大以及粮食深加工技术的迅速发展，陈化粮已消耗殆尽，不能满足燃料乙醇生产的需求。利用大量粮食生产燃料乙醇会拉抬粮食的价格，影响我国粮食供需平衡，甚至关系到国家的粮食安全问题。2007 年国家发改委颁布了《关于促进玉米深加工工业健康发展的指导意见》，要求不再新建以玉米、小麦等粮食为主要原料的燃料乙醇项目，并大力鼓励发展以非粮作物为原料开发燃料乙醇。2001 年 3 月，“十五”国家重点示范装置——全国第一套年

产 10 万吨燃料乙醇生产示范装置在天津大学建成并成功运行，攻克了我国燃料乙醇生产技术的瓶颈，实现了由“造酒”到“造燃料”的技术跨越，为我国燃料乙醇的规模化生产奠定了基础。2008 年，我国第二代燃料乙醇取得突破性进展，中粮集团利用木薯制取乙醇获得成功，迈出“以非粮作物开发乙醇”的关键一步。2013 年我国燃料乙醇总产量突破 200 万吨，成为继美国、巴西之后世界第三大燃料乙醇生产国。在燃料乙醇推广上，目前，我国相继有 11 个省区在推行车用乙醇汽油，有 8000 多万辆汽车在使用，乙醇汽油市场份额占到全国汽油消费总量的 25% 以上。《可再生能源中长期发展规划》中也明确提出，到 2020 年，燃料乙醇年利用量将达到 1000 万吨，也就是说每年可调和乙醇汽油 1 亿吨以上，可在全国更广泛的区域推广使用乙醇汽油。

## 7.2 燃料乙醇的生产

### 7.2.1 乙醇生产的原料

#### 1. 淀粉质原料

淀粉质原料是生产酒精的主要原料，我国发酵酒精的 80% 是用淀粉质原料生产的。薯类、玉米具有容易种植、单产量大，淀粉含量高的特点。我国乙醇生产中，其中薯类原料（图 7-1 和图 7-2）约占 45%，玉米谷物等原料约占 35%。大量利用淀粉生产燃料乙醇会抬抬粮食价格，同时对粮食安全构成影响。



图 7-1 甘薯



图 7-2 木薯

#### 2. 糖质原料

糖蜜（见图 7-3）是制糖工业中产生的副产物。糖蜜中糖含量较高，一级糖蜜含糖分可达 50% 以上。相对淀粉而言，糖质原料（见图 7-4）生产酒精工序简单，是酒精发酵的理想原料，由于其他发酵工业也都需要糖质原料，糖质用于酒精生产原料较为有限。

#### 3. 木质纤维素

木质纤维素原料主要包括农作物下脚料（秸秆、花生壳、稻壳、棉籽壳等）、林木加工工业的废料（树枝、木屑等）、工厂纤维素和半纤维素下脚料（甘蔗渣、废纸浆等）及城市垃圾四大类。纤维素来源丰富，价格低廉，随着纤维素降解技术的发展，纤维素将成

为最有前景的乙醇发酵原料。



图 7-3 糖蜜



图 7-4 甜菜

7.2.2 燃料乙醇的生产

依据生产原料的不同，燃料乙醇生产技术主要分为三代。第一代燃料乙醇技术以玉米、小麦等粮食作物为生产原料；第二代燃料乙醇技术以非粮作物为生产原料；第三代燃料乙醇技术是以木质纤维素作为原料来进行乙醇生产。

第三代生物乙醇技术的开发是当前生物能源开发的攻关重点（见图 7-5）。木质纤维素主要来源于植物细胞的细胞壁，由纤维素、半纤维素、木质素三种成分组成，在植物的不同组织中三种成分间的比例会存在差异。成分上看，木质纤维素是由 C、H、O 元素组成的碳水化合物，木质纤维素在经过预处理后，转化为小分子糖类，作为乙醇发酵的原料。

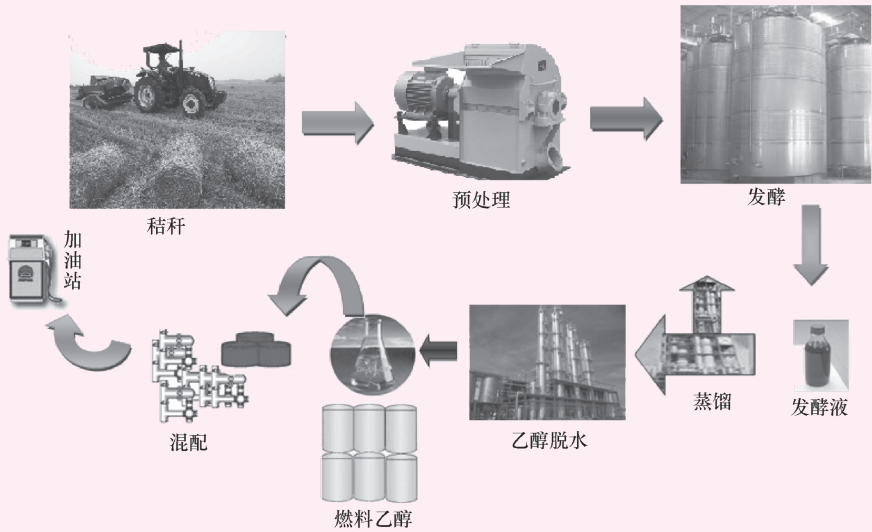


图 7-5 生物燃料乙醇的制备

利用木质纤维素制备燃料乙醇主要分为三个环节：第一阶段是木质纤维素的预处理，由于天然纤维素的结构致密，必须经过预处理使其降解成为小分子糖才能被微生物发酵，预处理过程中，通过物理、化学或酶技术将纤维素聚合物降解为小分子糖；第二阶段是乙

醇生成的阶段，微生物（一般采用酵母）厌氧发酵将小分子糖转化为乙醇；第三阶段是通过蒸馏回收乙醇，并将乙醇进行脱水处理，最终得到无水燃料乙醇。

### 7.2.2.1 木质纤维素的预处理

木质纤维素需要降解为小分子糖以后，才能作为原料进行乙醇的生产；因此，原料预处理的目的是破坏木质纤维素的结构，预处理技术决定了燃料乙醇生产成本和发展水平。

#### 1. 木质纤维素的结构

木质纤维素是细胞壁的主要组成部分，它为植物提供了必要的支撑，塑造了整个植物的形状和轮廓。木质纤维素主要由纤维素、半纤维素和木质素组成，另外在木质纤维素中还存在很少量的灰分、蛋白质。木质纤维素内部半纤维素、纤维素和木质素相互交联，半纤维素和木质素以共价键紧密结合，纤维素以氢键同半纤维素或木质素相结合，从而共同组成了一个致密而完整的坚固结构，因此造成木质纤维素难以被微生物直接水解、利用<sup>[1]</sup>。

##### (1) 纤维素

纤维素是由 D-葡萄糖以  $\beta$ -1, 4-糖苷键连接形成的线性高聚物，分子式为  $C_6H_{10}O_5$ ，纤维素结构如图 7-6 所示。纤维素中 D-葡萄糖分子内和分子间形成大量的氢键，使得纤维素结构致密，同时，纤维素复杂的形态结构将大量可反应的羟基封闭，降低了纤维素的化学活性。要提高纤维素的反应活性，需降低纤维素的结晶度，可以通过物理或化学的方法对纤维素进行预处理（活化）。

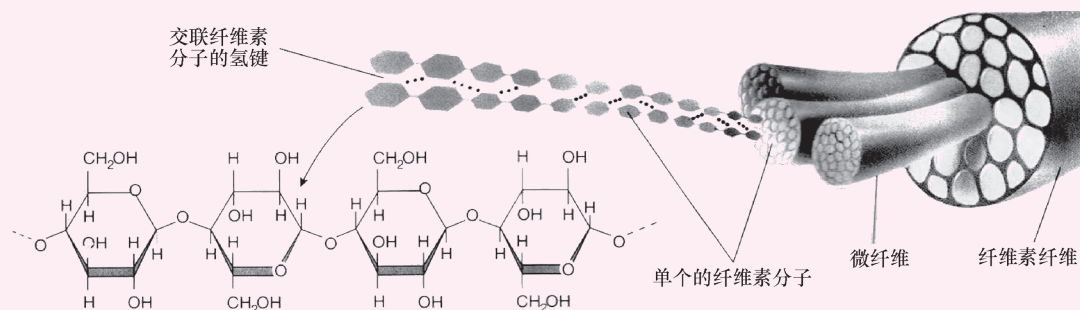


图 7-6 纤维素结构

##### (2) 半纤维素

与纤维素不同，半纤维素具有亲水性，是引起植物细胞壁润胀的物质基础。半纤维素是由木糖、阿拉伯糖、葡萄糖、甘露糖、半乳糖组成的高聚物，分子间主要通过  $\beta$ -1,4-糖苷键、氢键连接。其中木糖是半纤维素的主要组成成分，阿拉伯糖、葡萄糖、甘露糖的含量相对较低。

##### (3) 木质素

木质素是由苯基丙烷单元（香豆醇、松柏醇、5-羟基松柏醇、芥子醇）组成的一种酚类聚合物。在木质纤维素结构中，半纤维素和纤维素相互连接，木质素充填在纤维素与半纤维之间，从而增强了细胞壁的机械强度。木质素水解后得到的单体中无糖类物质，因此



木质素既无法作为乙醇发酵原料，又阻碍了纤维素的降解，是后续工艺中需要被分离除去的组分。

2. 预处理主要解决的问题

纤维素是纤维的骨骼物质，木质素与半纤维素分散在纤维周围。由于木质纤维素既不溶于水，也不溶于一般的有机溶剂，化学性质非常稳定，微生物无法直接、高效地利用纤维素发酵乙醇，预处理的目的是要破坏纤维素的结构，将木质纤维素结构变松散，或将木质纤维素降解为小分子的糖，从而将木质纤维素转化为能被微生物或酶容易利用的原料。木质纤维素预处理的评价指标主要包括以下几个方面：

- 获得较高的可发酵糖浓度。
- 能降低木质纤维素结晶度，提高木质纤维素化学活性，有利于提高水解得糖率，或有利于提高随后的微生物酶解作用产糖量。
- 预处理产物中抑制性作用的副产物较少，避免对后续发酵过程的影响。
- 较少的水用量，较低的能量消耗及设备投资，即生产成本低，具有经济上可行性。
- 具有环保性，产生很少的污水、废渣。

3. 木质纤维素预处理方法

原料进行预处理可以部分破坏其致密的结晶结构（见图 7-7），木质纤维素预处理方法主要有：物理法、化学法及物理化学法和生物法。

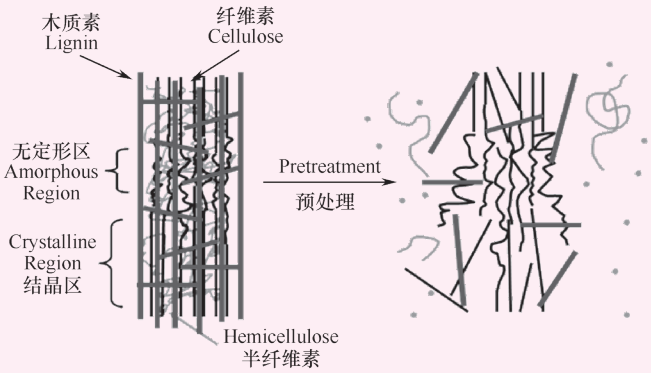


图 7-7 木质纤维素进行预处理

(1) 物理法

对植物纤维原料预处理的物理方法通常有：机械粉碎、微波处理、高能辐射和高温分解等方法，最常用的方法是机械粉碎法，物理法处理纤维原料后，纤维原料结构变松散，表面积增大。一般来讲，物理法处理纤维原料的优势在于，对环境污染小，处理过程较为简单，不足之处主要是能耗大，生产效率较低，没有从化学结构上对木质纤维素进行改性。

(2) 化学法

化学方法主要指以酸、碱、有机溶剂作为降解木质纤维素的预处理剂，将木质纤维素



浸泡于预处理剂中,可使纤维素、半纤维素和木质素吸胀,破坏其结晶结构,木质纤维素最终降解为能被微生物利用的底物,如纤维糊精、纤维二糖及葡萄糖等<sup>[2]</sup>。

**酸处理:** 酸水解的作用是将纤维素和半纤维素转化为单糖,以便于微生物利用。硫酸、盐酸、硝酸、磷酸是进行酸预处理的常用试剂。利用稀硫酸处理木质纤维素的工艺如下:将稀硫酸(0.5%~1.0%)和木质纤维素原料混合均匀,进行加热处理,温度控制在140℃~190℃。经过酸水解,纤维素被降解为葡萄糖,半纤维素分解成木糖和其他可溶性糖类。稀酸水解工艺简单,改进后的稀酸水解采用两步法,可避免单糖进一步脱水转化成糠醛等副产物。文献报道,玉米秸秆经稀硫酸预处理,木糖最高产率达到93%;玉米秸秆和玉米芯的混合原料进行稀硫酸预处理,所得最高木糖产率达到90%以上。酸水解的主要优点是工艺简单,单糖产率高,缺点是容易产生不利于发酵的副产物,例如半纤维素水解生成的木糖脱水转化为糖醛等副产物,这些副产物往往对微生物有毒害作用,会影响下一步的发酵效率;另外,完成预处理后,要对原料进行中和处理。

**碱处理:** 碱可以削弱纤维素和半纤维素之间的氢键及皂化半纤维素和木质素之间的酯键,但预处理效果受原料中木质素含量的影响。经过碱处理后,木质纤维素出现更多孔隙。以氢氧化钠为例,氢氧化钠处理木质纤维素后,木质素发生降解,半纤维素溶解于碱溶液中,纤维素则因水化作用而发生膨胀,纤维素的整个结晶度出现降低。据报道,用1% NaOH在121℃处理木质纤维素1 h,能脱去80%以上木质素。因此,用稀NaOH溶液对木质纤维素进行处理,可使原料得到润胀,从而增加其内部表面积,降低聚合度和结晶度,同时可将木质素与碳水化合物分离,实现降解木质纤维素的目的。

**氨处理:** 利用氨水对木质纤维素材料进行处理也是一种常见的预处理方式,包括氨水浸泡、氨回收浸没两种处理方式。氨水浸泡是指在常温条件下将纤维素浸泡在质量分数5%~20%氨溶液中,以脱除木质纤维素中的木质素。优点在于氨处理条件温和,所需设备简单。在此基础上开发了氨回收浸没技术,氨回收浸没技术具有高效特点。在高温(150℃~170℃)下,使氨水通过待处理的原料然后将氨水回收,此方法可以快速脱去原料中大部分木质素。

**有机溶剂处理:** 高温条件下,有机溶剂可破坏木质素和半纤维素之间的连接,将木质素溶解,还使纤维素发生润胀,但有机溶剂存在腐蚀和毒性等缺点,易造成环境污染。操作中,常用的有机溶剂包括甲醇、乙醇、丙酮、二甲亚砜、乙二醇等。有机酸,如乙酸、乙酰水杨酸和水杨酸等在有机溶剂处理过程中可作为催化剂,加快木质纤维素的降解。有机酸在木质纤维素原料处理过程中主要有两个作用,一是游离的氢离子加速了木质素及半纤维素的脱除,另一个是有机酸能够溶解木质素。

### (3) 物理化学法

**蒸气爆破法:** 是指木质纤维素在高压水蒸气中短暂加热,然后快速卸压,从而使原料经历爆发性减压过程。在爆破过程中,高压蒸气渗入纤维内部,膨胀气体造成纤维机械断裂;同时物料内的高压液态水迅速爆沸,对外做功,加剧了纤维素内部氢键的破坏造成其有序结构的变化。目前已有不少研究者直接利用蒸气爆破法对纤维素材料进行预处理。中国热带农业科学院郑丽丽等利用蒸气爆破法对香蕉茎秆进行预处理研究<sup>[3]</sup>,以探讨不同压

力对香蕉茎秆中半纤维素、纤维素及木质素组分的降解程度,结果表明,蒸气爆破技术具有降解木质纤维素的作用,当操作压力 3.5 MPa,维压时间 4 min 时,香蕉茎秆中半纤维素含量由预处理前 13.33% 降至 4.36%,降解率达 67.29%,纤维素含量由 48.33% 降至 39.15%,降解率为 18.99%,木质素含量由 14.62% 降至 6.52%,降解率为 55.40%,总体含量由 76.28% 降至 50.03%,降解率为 34.41%。中国农业大学张连慧采用低压蒸气爆破技术处理小麦秸秆木质素,通过单因素试验,考察蒸气爆破过程汽爆压力、液固比、物料粒度、维压时间对木质纤维素降解的影响,木质素的降解率达到 22.67%。通过设计  $L_9(3^4)$  正交试验,上述因素影响主次顺序为汽爆压力 > 液固比 > 维压时间 > 物料粒度,优化条件为汽爆压力 0.6 MPa,液固比为 20:1,维压时间为 30 min,物料粒度为 20 ~ 60 目。红外光谱分析表明,经汽爆后麦秆木质素结构受到了一定程度的破坏;麦秆的纤维束受到了破坏,发生了断裂,且出现了多孔的结构<sup>[4]</sup>。

**氨纤维爆破法:**氨纤维爆破法与蒸气爆破预处理类似,即利用氨水预浸原料,然后再用蒸气爆破处理。该法可去除部分半纤维素与木质素,降低纤维素的结晶性,不产生对微生物有抑制作用的物质。氨纤维爆破法存在的主要问题是需要对氨水回收利用,投资成本较高。

#### (4) 微生物降解法

微生物降解木质纤维素具有条件温和、专一性强、能耗低、不会对环境造成污染等特点。微生物降解法即利用微生物对木质纤维素进行降解,在自然界中可分解木质素的天然微生物大多为真菌类,主要包括白腐菌、褐腐菌和软腐菌。白腐菌是降解木质纤维素效率最高效的菌种(见图 7-8),能够分泌木质素过氧化物酶、漆酶、锰过氧化物酶,能高效将木质素分解。褐腐菌(见图 7-9)是降解木材能力极强的一类担子菌,使纤维素和半纤维素迅速解聚。

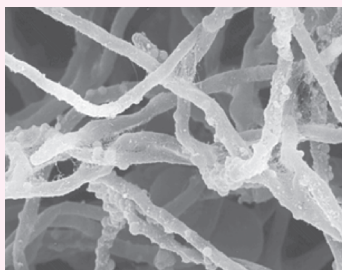


图 7-8 白腐菌



图 7-9 桃褐腐菌



图 7-10 纤维素酶的空间结构

#### (5) 生物酶法

生物酶法处理木质纤维素是指利用能降解纤维素的纤维素酶对木质纤维素进行降解,从而获得小分子糖的过程。所谓纤维素酶是指可以将纤维素分解成寡糖或单糖的酶蛋白质,它是一种多组分的复合酶,是由球状的催化结构域、富含脯氨酸或羟基氨基酸的连接桥以及纤维素结合结构域三部分组成<sup>[5]</sup>。其结构如图 7-10 所示。

纤维素的酶水解机理还处于研究阶段，但普遍认为在将天然纤维素水解成葡萄糖的过程中，必须依靠3种组分的协同作用才能完成：内切葡聚糖酶随机切割纤维素多糖链内部的 $\beta$ -1,4-糖苷键，从而暴露出不同长度的寡糖和新链的末端。外切葡聚糖酶作用于这些还原性和非还原性的纤维素多糖链的末端，释放葡萄糖或纤维二糖。 $\beta$ -葡萄糖苷酶最终将纤维二糖水解为葡萄糖分子。

酶解法对木质纤维素进行预处理具有能耗低、反应条件温和、操作简单、不污染环境的优点。经酶解后，木质纤维素主要被转化为溶解性葡萄糖和纤维二糖。纤维素酶的来源非常广泛，昆虫、软体动物、原生动物、细菌和真菌等都能产生纤维素酶。特别是一些厌氧菌，如梭状芽孢杆菌和拟杆菌，分泌的纤维素酶具有很高的比活力；反刍动物瘤胃中的厌氧性细菌，也可产生纤维素酶，如产琥珀酸拟杆菌、牛黄瘤胃球菌、白色瘤胃球菌、溶纤维丁酸弧菌等。随着纤维素酶生产技术日益成熟，成本大幅度降低，酶解法已经开始逐渐取代酸解法来处理木质纤维素。

### 7.2.2.2 生物乙醇的发酵

木质纤维素经预处理后，纤维素的晶体结构被破坏，并水解为葡萄糖，通过进一步厌氧发酵后即可生成乙醇。工业上常采用微生物（酿酒酵母或卡尔酵母）进行乙醇发酵，在厌氧条件下，当微生物细胞吸收葡萄糖后，葡萄糖经己糖激酶、磷酸己糖异构酶、磷酸己糖激酶的作用，生成1,6-二磷酸果糖，1,6-二磷酸果糖再经过一系列酶的作用，降解生成丙酮酸（糖酵解途径，又称EMP途径），丙酮酸进一步脱羧形成乙醛，乙醛最终被还原成乙醇，反应方程式为： $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$ 。乙醇发酵原理如图7-11所示。

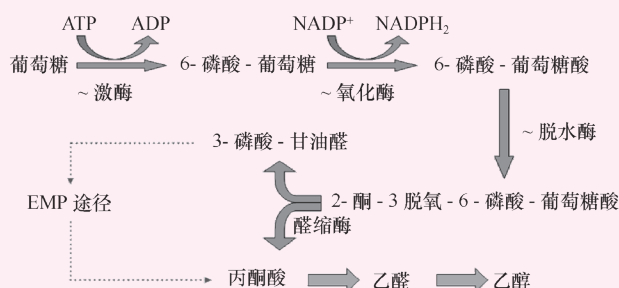


图 7-11 乙醇发酵过程

常用的发酵工艺包括：直接发酵工艺、分步水解发酵工艺，同步糖化发酵工艺以及固定化酶水解发酵工艺。

#### 1. 直接发酵工艺

直接发酵的特点是利用纤维分解细菌直接降解木质纤维素同时生产乙醇，原料不需要经过酸解或酶解预处理过程。该工艺方法步骤简单，成本低廉；缺点是乙醇产率低，产生有机酸等副产物。

#### 2. 分步水解发酵工艺

分步分解属于传统的乙醇发酵工艺，流程简单，容易实现工业化。其特点是木质纤维素

的水解以及水解产物的发酵过程是在不同的反应器中进行（见图 7-12）。木质纤维素经水解后转化为葡萄糖等小分子的单糖，这些单糖在微生物作用下经厌氧发酵过程可转化为乙醇。目前纤维素乙醇的生产大多采用此工艺过程。

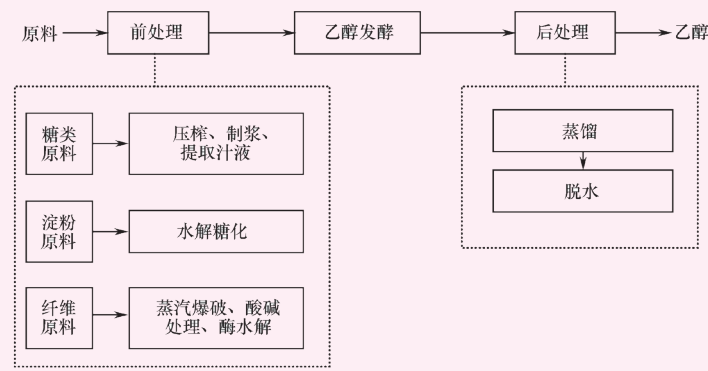


图 7-12 燃料乙醇的生产

3. 同步糖化发酵工艺

同步糖化发酵是指木质纤维素的水解与乙醇发酵同步进行的发酵工艺。纤维素水解产生的纤维二糖会抑制纤维素酶中外切型葡聚糖酶的活性，而  $\beta$ -葡萄糖苷酶可连续不断地将纤维二糖分解成葡萄糖，使纤维二糖保持低浓度，这样可解除纤维二糖对纤维素酶的抑制。另一方面，纤维素酶系中  $\beta$ -葡萄糖苷酶又受到产物葡萄糖的反馈抑制，为降低葡萄糖的抑制作用，可以将纤维素酶和酿酒酵母放在同一个容器里进行混合发酵，由于发酵罐内的纤维素水解速度远低于酿酒酵母利用葡萄糖的速度，因此，可使发酵罐中的葡萄糖保持低浓度，从而解除了纤维二糖对纤维素酶的抑制作用，提高了纤维素酶解的效果，使糖化率提高。

同步糖化发酵法的主要问题是酶与菌株之间存在温度耐受性差异，纤维素酶的最佳反应温度与酿酒酵母的最佳发酵温度不一致，纤维素酶催化纤维素的水解温度为  $50^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ ，而酿酒酵母发酵温度为  $35^{\circ}\text{C}$  左右。当发酵罐罐体温度在  $35^{\circ}\text{C}$  时，酵母生长良好，但该温度不是纤维素酶的最佳催化温度，此时，纤维素酶酶活低、水解速度放缓，使得水解过程延长，降低了生产效率；当罐体温度控制在  $50^{\circ}\text{C}$  时，该温度下酶的催化活性最强，但该温度下酿酒酵母难以生长，无法进行酒精发酵。在生产中，可利用耐热酵母或耐热细菌取代传统的酿酒酵母，使发酵温度与纤维素酶的最佳反应温度靠近，从而提高纤维素的水解速度。同步糖化发酵法将纤维素水解与乙醇发酵过程耦联，克服了水解糖化和发酵两步生化反应中所出现的纤维二糖、葡萄糖反馈抑制现象，从而获得较高的乙醇产率。

4. 固定化微生物水解发酵法

微生物的固定化是指将微生物束缚在水不溶性的载体上，固定后的微生物仍能进行其特有的催化反应，并可回收及重复利用的一类技术。在应用方面，目前常以固定化运动发酵单胞菌和酵母进行乙醇发酵，常用载体主要包括海藻酸钙、卡拉胶、多孔玻璃等。微生物在固定后，仍保持其高效催化能力，同时固定化的微生物还可以多次重复使用，这种工



艺具有操作连续可控、工艺简便等优点。

### 7.2.2.3 生物乙醇的脱水

微生物发酵得到的乙醇浓度低，低浓度的溶液，要获得无水乙醇需要在蒸馏工段进行浓缩，通常采用精馏或多效精馏的方法进行乙醇浓缩，因乙醇和水可形成恒沸物（对应的恒沸温度为 78.15℃），蒸馏得到的乙醇其最高质量浓度只能达到 95%。然而，燃料乙醇的标准要求乙醇浓度达到 99.5% 以上，为了提高乙醇浓度，就需配合其他脱水工艺，去除乙醇中多余的水分。

目前制备燃料乙醇的方法主要有恒沸精馏、萃取精馏、分子筛吸附、膜分离法等。

#### 1. 恒沸精馏法

恒沸精馏又称为共沸精馏，恒沸精馏是无水乙醇的常规生产方法，其基本原理是在乙醇水溶液中加入挟带剂（如苯、环己烷、戊烷、乙二醇等），乙醇、水和挟带剂会形成一系列的多元共沸物，其中乙醇 / 水 / 挟带剂组成的三元共沸物的沸点最低，且该三元共沸物中水的百分含量要高于乙醇 / 水二元共沸物中水的含量，在进行蒸馏过程中，水会被三元共沸物带走，从而达到乙醇脱水目的。在乙醇脱水共沸精馏工艺中，苯是共沸精馏法中最常用的挟带剂，但由于苯的使用对操作人员的身体有害，考虑到安全和环保，绿色环保的新工艺将逐渐取代苯工艺。

#### 2. 萃取精馏

所谓萃取精馏是指向精馏塔顶连续加入高沸点萃取剂，通过改变料液中被分离组分间的相对挥发度，使普通精馏难以分离的液体混合物变得易于分离的一种精馏方法。乙醇脱水过程中，在乙醇—水共沸料液中通过加入高沸点萃取剂，改变乙醇和水的汽液平衡关系，使其相对挥发度增大，共沸点消失，从而实现乙醇与水的分离。目前燃料乙醇生产过程中最常用的萃取剂是乙二醇，乙二醇使用时无损失，能循环使用，且环境污染少，设备简单操作方便。

#### 3. 膜分离

利用膜的选择性来实现料液中不同组分的分离、纯化、浓缩的方法称作膜分离（膜分离法如图 7-13 所示）。渗透气化法是目前利用膜分离法生产无水乙醇的主要途径。渗透气化是以混合物中组分蒸气压差为推动力，依靠水、乙醇在膜中的溶解与扩散速率不同的性质来实现水、乙醇分离的过程。料液进入渗透气化膜分离器，膜后侧保持低的组分分压，在膜两侧组分分压差的驱动下，组分发生透膜扩散，并气化成蒸气而离开膜器。其中扩散快的组分透过膜进入膜后侧，扩散慢的组分被截留，从而达到分离料液中不同组分的目的<sup>[6]</sup>。常用的膜材料包括有机膜、无机膜和有机 / 无机复合膜。有机膜材料中，由于聚乙烯醇具有较大亲水性，而且还具有高的耐磨性、延展率以及抗张力强度，广泛应用于燃料乙醇的脱水工序中。膜技术在乙醇脱水过程中具有操作简单、脱水效果好和能耗低等优点，是乙醇脱水领域发展的重要方向。



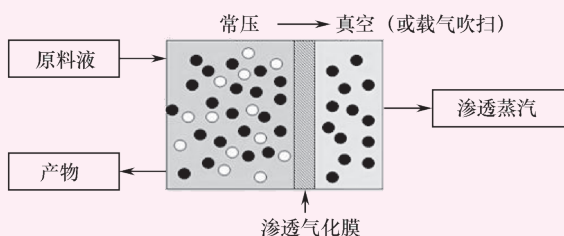


图 7-13 膜分离法

#### 4. 分子吸附

分子吸附是利用吸附剂对料液中某些少量组分进行选择性吸附来实现分离的目的。常用的吸附剂包括石灰、活性炭、离子交换树脂、分子筛、硅胶等。吸附技术在气液混合物的分离以及工业上痕量物质的纯化方面具有独特优势。生产上，由于分子筛具有吸附速度快、易再生、抗碎强度大及抗污染能力强的特点，燃料乙醇工厂广泛采用分子筛进行乙醇脱水。分子筛是一类具有多孔性的铝硅酸盐，它们具有许多孔径均匀的孔道，直径比孔道小的气体或液体分子可以进入孔穴，而大的分子则截留在孔道外面，如图 7-14 所示。如 3A 分子筛，乙醇脱水过程中，水分子直径小能够吸附进入 3A 分子筛中，而直径较大的乙醇分子则无法进入分子筛中，从而实现乙醇中水分的分离。

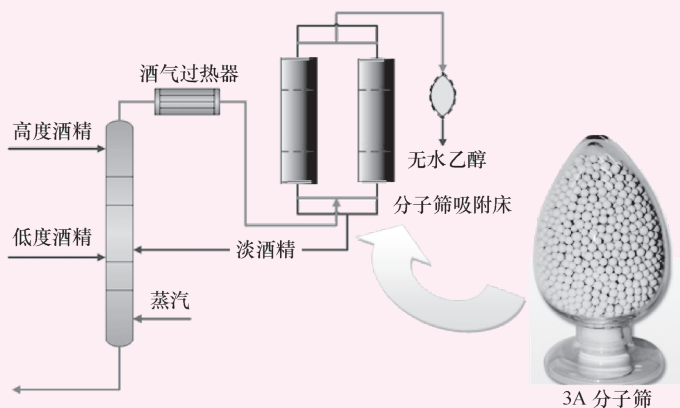


图 7-14 分子筛吸附

### 7.3 燃料乙醇的发展前景和挑战

为了推进新能源的发展、消化陈化粮，发改委、财政部等委 2003 年联合出台政策，在黑龙江、吉林、安徽、河南等省区推广玉米加工生产燃料乙醇试点项目，每生产 1 吨燃料乙醇国家补贴 1880 元，并减免一切税收。同时，我国开始推广使用乙醇汽油，即在普通无铅汽油中调配加入 10% 比例的燃料乙醇。目前我国已成为继美国、巴西之后的世界

第三大燃料乙醇生产国。但随着我国陈粮减少，燃料乙醇需求增多，陈化粮已无法满足燃料乙醇的生产。

随着粮食的短缺和价格的上涨，出现乙醇汽油“与人争粮、与粮争地”的新问题。2006年《国家发展改革委关于加强玉米加工项目建设管理的紧急通知》首次提出“坚持非粮为主，积极稳妥推动生物燃料乙醇产业发展”。自2007～2010年期间，发改委三次发文要求清理玉米乙醇项目，明确要求不得盲目发展玉米加工乙醇产能。2010年上半年，我国首次从玉米净出口国变为玉米净进口国，再次为我国的粮食安全敲响了警钟。以粮食为原料生产燃料乙醇，备受争议和质疑。中石油经济技术研究院发布的《2013年国内外油气行业发展报告》称，部分企业新粮使用比例甚至高达80%。从生产企业的角度来说，国内玉米乙醇企业面临较大的风险，企业只能被动承受玉米价格上涨带来的亏损，2013年粮食原料价格高涨、而乙醇销售价格却出现较大跌幅，燃料乙醇行业面临着销售不畅、库存增加、生产亏损的严峻形势。

在国家强调粮食安全的背景下，政策开始限制玉米乙醇的大规模生产，2013～2015年，中央财政对以粮食为原料生产燃料乙醇的补贴标准逐年降低，2013年300元/吨、2014年200元/吨、2015年100元/吨，2016年以后不再补贴。自2015年1月1日起国家将取消以粮食为原料的变性燃料乙醇定点生产企业的增值税先征后退政策，同时以粮食为原料生产用于调配车用乙醇汽油的变性燃料乙醇也将恢复征收5%的消费税。

另一方面，为了推动纤维素乙醇的发展，我国《可再生能源中长期发展规划》明确指出，今后将不再增加以粮食为原料的燃料乙醇生产能力，积极发展非粮生物液体燃料。2014年，国家下发了纤维燃料乙醇的补贴标准，每吨补贴800元，远高于当年粮食燃料乙醇200元/吨的补贴标准，显示了国家在推动纤维燃料乙醇方面的支持力度。

在非粮乙醇生产方面，我国目前仍处于起步阶段，面临一系列技术难题。木质纤维素生产燃料乙醇的技术难题主要体现三个环节：（1）原料的收集与储运。甜高粱茎秆储存、木薯废液处理等关键技术尚未突破；（2）纤维素酶解技术。纤维素的降解、糖化是燃料乙醇发酵的关键，由于缺乏高效生产纤维素酶菌株，使得纤维素酶解、糖化成本非常高，导致纤维素乙醇价格无法与粮食乙醇相竞争；（3）菌株的选育。木糖是半纤维素水解后的产物，传统的乙醇发酵菌株难以利用木糖作为发酵底物，使木糖没有充分的利用，今后还需利用分子生物学构建能高效利用五碳、六碳混合糖的发酵菌株，实现木质纤维素降解物的全糖利用，从而降低纤维素乙醇的生产成本。

植物纤维素是地球上最丰富的可再生资源，利用纤维素生产燃料乙醇会对我国能源结构、生态环境、经济发展发挥重大影响。随纤维素乙醇技术瓶颈的攻克，燃料乙醇的生产成本会大幅降低，纤维素乙醇的发展将创造更大的社会效益和经济效益。

## 参考文献

[1] 高鹏飞. 玉米秸秆制备生物乙醇及其综合利用 [D]. 西安: 西北大学, 2009.

- [2] 祖帅. 酸碱耦合预处理及酶水解玉米秸秆制备单糖的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [3] 郑丽丽, 韩冰莹, 盛占武等. 蒸气爆破预处理降解香蕉茎秆纤维素组分的研究 [J]. 热带农业科学, 2014, (11): 84-88.
- [4] 张连慧, 石力安, 王体朋等. 蒸气爆破过程麦秆木质纤维素的转化 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 195-199.
- [5] 诸力. 不同预处理工艺对竹子制备纤维素乙醇酶解效果的影响 [D]. 临安: 浙江农林大学, 2012.
- [6] 刘继泉, 胡存, 秦娟妮等. 膜分离技术在无水乙醇生产中的应用 [J]. 酿酒, 2005, 33(3): 38-40.

第 8 章

生物质固体成型



所谓生物质固体成型技术，指在外力作用下，以生物质中的木质素充当粘合剂，将分散的秸秆、木屑或树枝等农林生物质压缩成棒状、块状或颗粒状等具有一定形状和密度的成型燃料。在生物质固化成型过程中，通过克服摩擦力及弹塑性变形做功，颗粒表面能转化成内能储存在成型燃料中，使得成型燃料的能量密度增加，提高了燃烧值。2007 年中华人民共和国国家发展和改革委员会通过并发布实施的《可再生能源中长期发展规划》中明确指出：在生物质能利用技术状况中，重点发展固体成型燃料。

## 8.1 成型燃料的特点和行业标准

### 8.1.1 成型燃料的特点

秸秆、木屑、锯末等生物质结构松散、能量密度低，热效率仅为 10% 左右，且不易保存、不便运输。这些生物质经固化以后，体积减小，密度增大，其密度可达  $0.8 \sim 1.35 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，体积压缩比为 7 ~ 10 倍，燃烧效率平均提高 20% ~ 30%，便于储存、运输和处理。生物质经过固化成型后，它具有燃烧特性好、燃烬率高、粉尘少、化学污染排放低的优势。成型技术扩大了生物质的应用范围，可以取代煤、燃气等作为民用燃料进行炊事、取暖等，也可用于工业锅炉的燃料。生物质固体成型燃料的特性包括以下几方面（见表 8-1）。

（1）实现温室气体二氧化碳生态“零”排放：成型燃料的能量来源于自然界光合作用固定于植物上的太阳能，其燃烧时排放的二氧化碳来自于其生长时对自然界二氧化碳的吸收，因此，成型燃料具有二氧化碳生态零排放的特点。

（2）低碳能源：成型燃料的燃烧以挥发份为主，易于燃烧，其固定碳含量仅为 15% 左右，典型的低碳燃料。

（3）减少二氧化硫排放：成型燃料含硫量比柴油还低，仅为 0.05%，不需设置脱硫装置就可实现二氧化硫减排，降低了企业处理脱硫成本。

（4）粉尘排放达标：成型燃料灰份低，约为 3% ~ 5%，是煤基燃料的 1/10 左右，设置简单的除尘装置就可实现粉尘排放达标。

（5）减少氮氧化物的生成：成型燃料氮含量低，氧含量高，燃烧时能有效减少空气的需求量，减少氮氧化物的生成。

（6）来源于农林废弃物：原料分布广泛多样、热含量大、成本低，循环生长，是典型的循环经济项目。燃烬率可达 96%，剩余 4% 的灰分可以回收做钾肥，实现了“秸秆→燃料→肥料”的有效循环。此外，不会产生“与人争粮”和“与人争地”的社会问题。

（7）安全方便：成型燃料密度大、体积小，固体成型，密封包装，运输储存安全方便。



表 8-1 工业锅炉热性能及大气污染物排放现状

锅炉类型 燃料种类		工业锅炉			
		燃煤（散煤）	燃煤（型煤）	燃用生物质	天然气
热效率（%）		65 ~ 75	75 ~ 80	80 ~ 83	90
大气 污 染 物 排 放	烟尘（mg/m <sup>3</sup> ）	1500	800	250	微量
	SO <sub>2</sub> （mg/m <sup>3</sup> ）	1.2S ~ 3.2S	1.0S ~ 2.2S	< 20	微量
	NO <sub>x</sub> （mg/m <sup>3</sup> ）	100 ~ 150	80 ~ 150	50 ~ 150	150
	CO（%）	0.08 ~ 0.1	0.05 ~ 0.1	0.05 ~ 0.4	0.02
	CO <sub>2</sub> （t/t 煤）	1.5 ~ 1.6	1.4 ~ 1.5	排放与生长期抵消	2.4（t/km <sup>3</sup> ）
	林格曼黑度（级）	1 ~ 2	1	1	1

8.1.2 现行的行业标准

在标准制定方面，国外如欧洲已经制订了比较详细的标准，例如奥地利的国家标准 ONORMM 7135（压块和颗粒）、瑞典的国家标准 SS18 7120（颗粒）和 SS18 7121（压块）、德国的国家标准 DIN 51731（压块和颗粒）、意大利的国家标准 CTI-R 04/5（压块和颗粒）。欧盟也已制定了一个通用的生物质颗粒技术分类规范（CEN/TS 14961）。

我国于 20 世纪 80 年代末制订了 GB/T 17664-1999《木炭和木炭试验方法》、GB 5186-1985、NY/T 12-1985《生物质燃料发热量测试方法》、GB/T 21923-2008《固体生物质燃料检测通则》等国家或农业行业标准；GB/T 21923-2008《固体生物质燃料检验通则》统一了有关生物质燃料及其检验的概念、术语和定义、检验规则和结果表述等。2008 年 11 月由河南农业大学主持制订了农业部《生物质固体成型燃料技术条件》和《生物质固体成型燃料加工设备技术条件》两个标准，已于 2010 年 9 月 1 日颁布实施。为今后建立的一系列固体生物质燃料检验标准或技术规范（包括采样、制样）奠定基础。

8.1.3 成型燃料的应用

由于生物质原料产地分散、质地疏松、能量密度小，给采集、储运和使用带来诸多不便。经致密成型加工后的生物质固体成型燃料，其粒度均匀、单位密度和强度增加，便于运输和储存，且燃烧性能明显改善。

生物质成型燃料燃烧时，其温室气体排放量仅为煤炭的 1/9，NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的排放量分别为煤炭的 1/5 和 1/10，生物质成型燃料不但燃烧性能优于普通燃煤，而且价格较低，对环境无污染，易于实现产业化，适合大规模使用，可用于农村家庭炊事、满足取暖用能需求，可为城镇社区供热提供清洁燃料。

生物质能源的高效转化可以解决我国农村生物质资源浪费问题，满足了农村生产和生活对优质燃料的需求。生物质成型技术，结合生物质的特点、符合我国的国情，是目前生物质综合利用的最为现实有效的方法之一。成型技术的规模化应用可大大提高秸秆等农业废弃物的利用效率，并从根本上解决资源浪费问题，做到就地取材，充分利用当地的资源，满足了农村生产和生活能源的需求，为我国农村开辟新的能源利用途径。

随着生物质固体成型技术在我国的应用推广，更多遗弃的农作物秸秆以及农业加工副产品如花生壳、稻壳等生物质，得到较好的能源化利用。因此大力发展生物质成型燃料具有良好的经济效益、生态效益和社会效益，可以降低排放减少污染，增加绿化改良环境（见图 8-1）。全球生物质资源丰富，生物质能作为唯一能够保存的可再生能源，其推广和利用将对能源结构的改善和能源需求的短缺发挥其必要的作用。

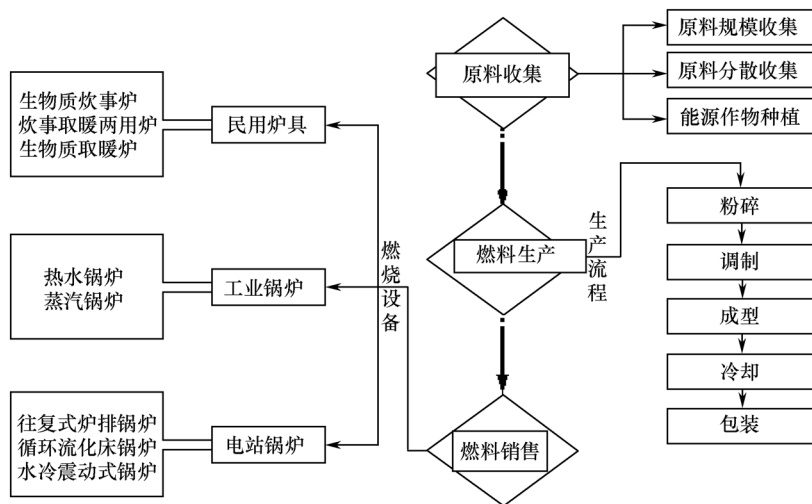


图 8-1 生物质成型燃料产业链

## 8.2 成型燃料的研究现状

生物质燃料成型技术始于 20 世纪初，研究的重点是如何解决成型后的生物质燃料不散、能长期存放等问题（见图 8-2）。

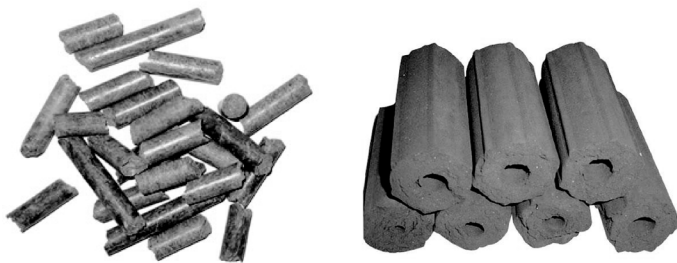


图 8-2 生物质成型产品

在 20 世纪 30 年代，美国开始研究压缩成型燃料技术，在 1976 年开发了生物质颗粒及成型燃烧设备。日本在 20 世纪 30 年代开始研究机械活塞式成型技术处理木材废弃物，1954 年研制成棒状燃料成型机及相应的燃烧设备，1983 年前后从美国引进颗粒成型燃料技术及相应燃烧设备，并建立了日本压缩成型及燃烧的工业体系。20 世纪 70

年代后期,西欧一些国家(比利时、芬兰、荷兰、瑞典、丹麦等)开始重视压缩成型技术及燃烧技术的研究,各国先后开发了冲压式成型机、颗粒成型机等各类成型机及配套的燃烧设备,目前已形成产业化生产,成效显著。亚洲一些国家(泰国、印度、韩国和菲律宾等)在20世纪80年代已建了不少生物质固化、炭化专业生产厂,并研制出相应的燃烧设备。历经80年的发展,压缩成型技术已逐步成熟,欧美国家已进入大范围规模化、产业化应用阶段,成型的生物质燃料在供暖、干燥、加热、发电等领域普遍使用<sup>[2]</sup>。

我国生物质固化成型技术起步较晚,从20世纪80年代开始引进螺旋式生物质成型机,经过大专院校和科研院所引进、消化吸收、改进、自行设计,先后研制出了各种生物质成型机、炭化机组及配套的生物质燃烧炉。“八五”期间,中国林业科学研究院林产化学工业研究所、中国农机院能源动力研究所、辽宁省能源研究所、中国农业工程研究设计院,对生物质冲压式和挤压式压块技术及装置、烧炭技术及装置、多功能燃烧炉技术进行了攻关,攻克了林木生物质压缩成型的关键技术,使我国在该领域的研究水平上了一个新台阶。20世纪90年代中后期,湖南农业大学、中国农机院能源动力研究所分别研究出机械冲压式成型机,河南农业大学研制出液压驱动活塞式成型机,中国林业科学研究院林产化学工业研究所研制了内压环模颗粒成型机。20世纪90年代以来,我国部分省市能源部门、乡镇企业及个体生产者积极引进成型技术,创办生产企业,全国先后40多个中小型企业开展了这方面的工作,并进行了产业化生产,形成了固化成型的良好势头。

我国生物质固体成型燃料技术得到飞速发展,生产和应用已初步形成了一定的规模。截至2009年底,国内有生物质固体成型燃料生产厂260余家,生产能力约76.6万吨/年。主要用于农村居民炊事取暖用能、工业锅炉和发电厂的燃料等。相当于替代38.3万吨/年,减少温室气体排放83万吨/年,为农民增收节支2.3亿元,社会、生态和环境效益显著。2011年时,国内有生物质固体成型燃料生产厂达到680余家<sup>[3]</sup>。

## 8.3 生物质固体成型原理

### 8.3.1 生物质各组分的作用

#### 1. 木质素是生物质固有的最好的内在黏结剂

纤维素、半纤维素和木质素是生物质重要组成部分,木质素是含量仅次于纤维素的一种最丰富的高分子化合物,例如针叶木中木质素含量为27%~32%,禾草类中木质素含量为14%~25%。虽然在各种植物中都含有木质素,但木质素的结构非常复杂,各种植物的木质素结构均不相同,即使在同一植物中,木质素的结构因存在的部位不同而大不相同。木质素共有三种基本结构,分别是愈创木基结构、紫丁香基结构、对羟基苯基结构,如图8-3所示。木质素为具有芳香族结构的单体,是由苯基丙烷单元构成的三维空间聚合

物，属非晶体，没有熔点但有软化点，木质素在  $70^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$  时软化，软化后具有一定的黏性，具有黏结作用，当温度达到  $200^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$  时，木质素成熔融状，黏性增加。此时施加一定的扭力使其与纤维素紧密黏结并与相邻颗粒互相胶接，生物质颗粒开始重新排列位置关系，内部相邻生物质颗粒相互胶接，排解出分子结构中的空气，并发生机械变形和塑性流变。随外力的增大，生物质体积大幅度减少，容积密度显著增大，在外部由于高温引起部分木质素、纤维素裂解析出焦油或发生焦化，推出压模冷却后即可固化成型而不会散开，并具有一定的形状和强度。此时施加一定的压力，可使其与纤维素、半纤维素等紧密黏结并与相邻颗粒互相胶接，冷却后即可固化成型。生物质成型燃料就是利用这一原理挤压制成的<sup>[2]</sup>。

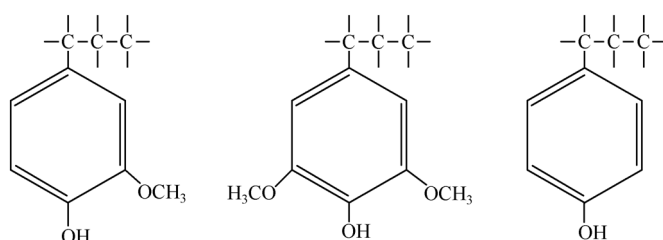


图 8-3 木质素三种基本结构

正是由于秸秆中木质素具有这种特性，生物质热压成型工艺不需任何添加剂或黏结剂，既降低生产成本，又减小压模壁挤压摩擦阻力，节约生产能耗，提高生产能力，也符合环保的要求。使用螺旋挤压式挤压机，其特点是成型燃料的密度大，表面质量好，燃烧效率高。

## 2. 半纤维素与纤维素的作用

半纤维素水解转化为木糖，也可起到黏结剂的作用。纤维素分子连接形成的纤丝，在粘聚体内发挥了类似于混凝土中“钢筋”的加强作用，成为提高成型块强度的“骨架”。

## 3. 水分是一种必不可少的自由基

水分流动于生物质团粒间，在压力作用下，与果胶质或糖类混合形成胶体，起黏结剂的作用。水分还有降低木质素熔融温度的作用，使生物质在较低加热温度下成型<sup>[4]</sup>。

## 4. 其他化学成分的作用

生物质所含的腐殖质、树脂、蜡质等对压力和温度比较敏感。当采用适宜的温度和压力时，有助于在压缩成型过程中发挥黏结作用。

生物质中的纤维素、半纤维素和木质素在不同的高温下，都能受热分解转化为液、固和气态产物。将生物质热解技术与压缩成型工艺结合，利用热解反应产生的热解油或木焦油作为黏结剂，有利于提高粒子间的黏聚作用，提高成型燃料的品位和热值<sup>[5]</sup>。

# 8.3.2 生物质固体成型过程

## 8.3.2.1 成型过程的黏结过程

生物质成型分为两个阶段。第一阶段，在压缩初期，较低的压力传递至生物质颗粒

中,使原先松散堆积的固体颗粒排列结构开始改变,生物质内部空隙率减少;第二阶段,当压力逐渐增大时,生物质大颗粒在压力作用下破裂,变成更加细小的粒子,并发生变形或塑性流动,粒子开始充填空隙,粒子间更加紧密地接触而互相啮合,一部分残余应力储存于成型块内部,使粒子间结合更牢固<sup>[4]</sup>。

### 8.3.2.2 颗粒填充与变形

生物质的固化成型机理可解释为密实填充、表面变形与破坏、塑性变形三种,生物质固化成型过程可分三个过程:①粒子间大量的空气和水分被排走,颗粒位置进行重新排列,并且有一定的密实化,如图8-4(a)所示;②颗粒发生弹性变形,造成颗粒表面发生变形与破坏,如图8-4(b)所示;③随外力逐渐加大,生物质颗粒出现塑性变形,颗粒间的空隙减少,颗粒间的接触面积增加,密度随之增大,将产生复杂的机械啮合、变形和分子间的结合力,此过程为塑性变形,如图8-4(c)所示<sup>[6]</sup>。

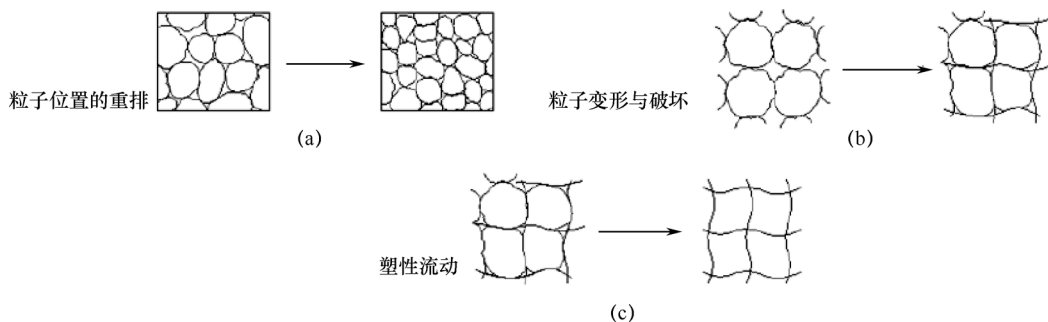


图8-4 生物质颗粒压缩成型过程

在生物质成型过程中,多种因素会对成型产品的密度、性能造成影响,主要因素包括物料种类、物料的粒度、含水率、加热温度、成型压力、模具尺寸、保型时间以及黏结剂等。

#### 1. 原料的种类

不同结构的生物质,对固化成型的过程有着很大的影响,它不但对成型燃料的物理品质(如成型燃料的密度、强度、热值等特性)有着很大的影响,而且对生物质的成型效率及消耗也有重要的影响。在常温情况下,一般纤维素植物(如秸秆和树皮)在载荷作用下易发生变形,容易固化成型,而木材废料在载荷作用下变形很小,难以固化成型;但在加热的情况下由于木材废料中木质素含量高,在高温下能发挥黏结作用,可快速成型,产品的强度高,表面质量也好。

#### 2. 物料的粒度

一般来说,小颗粒原料、纤维植物秸秆容易被压缩,而较大颗粒的原料、木材则难以被压缩。在相同的压力作用下,物料的粒径越小,物料的变形率和延伸率越大,经过成型孔越容易,物料成型则越容易,物料结合的越紧密,产品的密度就越大;另一方面,如果物料的粒径过小,则其粘性就会越大,流动性反而下降,成型燃料的强度下降;物料的粒



径过大时，物料就会难于压缩，可能造成成型孔的入口处结渣而堵塞。

原料粒度还影响成型机的效率及成型物的质量。原料粒度较大时，能耗大，产量小。原料粒度形态差异较大时，成型物表面易产生裂纹。但对有些成型方式，如冲压成型时，要求原料有较大的尺寸或较长的纤维。因此，生物质物料粒度不仅对成型机的工作效率、产量和能耗产生较大影响，而且还会影响成型燃料的质量和强度。

### 3. 物料的含水率

生物质中微量的水分对木质素的软化、塑化具有促进的作用，有利于生物质的固化成型。物料的含水率过高或过低对原料固化成型产生不利影响，如含水率过低，不仅会影响到木质素的软化，还会增大生物质颗粒间的摩擦力和抗压强度，造成大量的能量损耗。在热压成型过程中，如果物料的含水量太高，可能会导致在喂入物料的过程中发生堵塞现象，增大物料与成型孔内表面之间的摩擦力，造成不必要的能量损失；在温度较高时，形成大量水蒸气，易造成表面开裂，严重时会有爆鸣，导致不能正常成型；对于颗粒成型燃料，一般要求原料的含水率在 15% ~ 25%；对于棒状成型燃料，则要求原料的含水率不大于 10%。

### 4. 加热温度

通过对物料加热，可使物料中的木质素软化形成黏结剂，增强物料的塑性和流动性，有利于物料粒子间的紧密结合，变得容易固化成型，并为生物质中的分子结构变化提供能量，减小成型压力和降低能量消耗。当加热温度过低时，木质素达不到软化点，不能塑化变黏，这就需要施加很大的成型压力才能使物料固化成型，增加电机功耗；当温度过高时，虽然电机功耗和所需的成型压力都减小，但是压出来的成型燃料强度不够，容易断裂破损，并且成型燃料表面温度高，容易产生炭化，生成大量烟气。

### 5. 成型压力

成型压力是生物质固化成型的关键工艺参数之一，对生物质物料施加压力的主要目的是：①使物料的物相组织结构破坏，重新组合成新的物相组织结构；②增强分子间的凝聚力，使物料变得致密充实，以提高成型燃料的强度和刚度；③为生物质物料在成型孔内成型提供动力。如果对生物质物料施加的成型压力太小，则成型燃料不能黏结，并且无法克服摩擦阻力，所以无法固化成型；如果对生物质物料施加的成型压力太大，则成型燃料在成型孔内滞留时间过短，即保型时间太短，则物料无法成型。成型压力与模具的形状尺寸有密切的关系<sup>[6]</sup>。

### 6. 保型时间

保型的目的是为了消除刚成型的生物质燃料的残余应力，随着温度的降低，使其形状固定下来。保型时间决定着生物质的性能以及质量，物料在模具停留时间越长或保型筒长度越长，成型颗粒越耐用，成型所需的压力越小，能量消耗也较小。但物料如果在模具中保留时间过长，可能会导致生产效率下降，甚至引起模具堵塞<sup>[6]</sup>。

7. 黏结剂

在成型过程中添加黏结剂的主要目的是：提高成型燃料的燃烧性能、强度和质量，在成型燃料燃烧时不产生烟尘和异味。常用的黏结剂主要有无机黏结剂、有机黏结剂和纤维类黏结剂三类，包括：①无机黏结剂：水泥、黏土、水玻璃等；②有机黏结剂：焦油、沥青、树脂、淀粉等；③纤维类黏结剂：废纸浆、水解纤维等。其中纤维类黏结剂价格便宜，而且具有良好的黏结能力。添加黏结剂的要求是必须能够保证成型炭块具有足够的强度和抗潮解性，而且在燃烧时不产生烟尘和异味，最好黏结剂本身能够燃烧。

8.4 固体成型方法

8.4.1 工艺分类及特点

生物质压缩成型工艺有多种分类方式，可以根据原料在压缩成型工艺时是否添加黏结剂分为加黏结剂和不加黏结剂的成型工艺；根据压缩压力的大小分为高压压缩（> 100 MPa），采用加热的中等压力压缩（5 ~ 100 MPa），添加黏结剂的低压压缩（< 5 MPa）<sup>[7]</sup>。本节根据生物质压缩成型的加工方式，分为常温湿压成型、热压成型、常温成型和炭化成型，现简单介绍如下。

1. 湿压成型工艺

湿压成型工艺是指在常温下，通过挤压使粉碎的生物质纤维结构互相镶嵌包裹而形成成型燃料，其工艺流程如图 8-5 所示。该固化成型工艺适合于含水率较高的生物质物料，在进行固化成型之前要提前把物料在水中浸泡几天，利用水对纤维素的润涨，经过一定程度的腐化后，使物料中的纤维类物质变得湿润、柔软并有部分发生水解，使其加压成型得到了很明显的改善，从而提高了物料压缩的性能，易于物料固化成型。利用简单的模具，将部分降解后的农林废弃物中的水分挤出，即可形成低密度的压缩成型燃料块。湿压成型设备一般比较简单，容易操作，适用于含水量较高的原料，但成型过程中成型部件磨损较快，烘干费用高，多数产品燃烧性能较差。

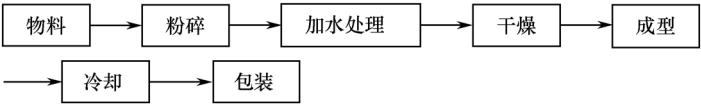


图 8-5 湿压成型工艺流程图

2. 热压成型工艺

热压成型是目前普遍采用压缩成型工艺，热压成型是指在较高的温度下使生物质中木

质素软化，发挥黏结剂的作用，借助压力作用将粉碎的生物质挤压成型。热压成型工艺中采用的成型设备主要有螺旋挤压成型机、活塞式成型机。根据在热压成型过程中加热物料的部位不同，又可分为非预热热压成型和预热热压成型。非预热热压成型是指物料在成型孔内固化成型的同时，在成型部位进行外部加热（见图 8-6）；预热热压成型是指在物料进入压缩机构之前进行加热，同时在成型部位也进行加热（见图 8-7）。相关试验表明，与非预热压缩成型工艺相比，预热压缩成型工艺能量的损耗将降低 40%，成型模具的使用寿命将延长 3 倍。

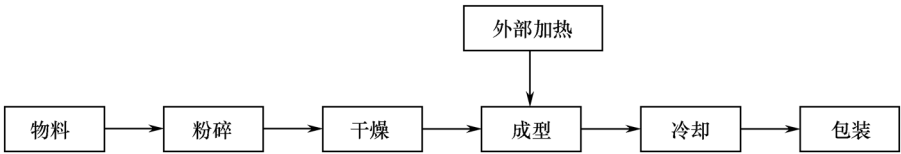


图 8-6 非预热热压成型工艺流程图

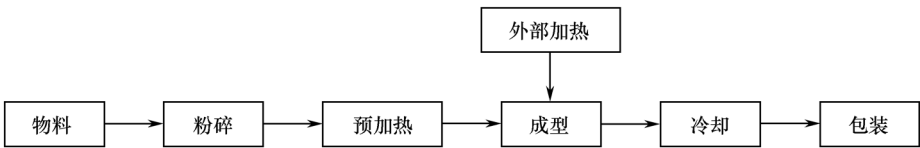


图 8-7 预热热压成型工艺流程图

3. 常温成型工艺

常温成型即在常温下对生物质高压挤压成型的过程。其黏结剂主要是靠挤压过程所产生的热量，使得生物质中木质素产生塑化黏结。常温成型工艺一般需要很大的成型压力，为了降低成型压力，可在成型过程中加入一定的黏结剂<sup>[2]</sup>。

该工艺不需要在成型部件外部加热，其固化成型的机理是物料在压力和含水率一定的情况下，依靠物料与成型部件之间产生的摩擦热使木质素软化、使其起到黏结的作用，从而固化成型。该工艺对物料的适应性比较强，对物料的含水率要求比较低，生产率高、单位耗能低，其工艺流程图如图 8-8 所示<sup>[6]</sup>。



图 8-8 常温成型工艺流程图

4. 炭化成型

炭化成型是指将生物质原料进行炭化或者是部分炭化，再加入一定量的黏结剂挤压成一定形状和尺寸の木炭棒。原料的纤维结构在炭化过程中受到破坏，使其挤压成型特性得到改善，成型部件的机械磨损和挤压过程中的能量消耗降低。但是，炭化后的原料在压缩成型时一般要加入一定量的黏结剂，否则需要较高的成型压力，提高成

型机的造价。

根据工艺流程不同,炭化成型工艺又可分为两类:一类是先成型后炭化,先用压缩成型机将生物质物料压缩成具有一定密度和形状的棒料,然后在炭化炉内炭化成为木炭;其工艺流程为原料—粉碎干燥—成型—炭化—冷却包装;另一类是先炭化后成型,先将生物质原料炭化或部分炭化,然后加入一定量的黏结剂压缩成型;其工艺流程为原料—粉碎除杂—炭化—混合黏结剂—成品干燥、包装<sup>[4]</sup>,如图8-9所示。

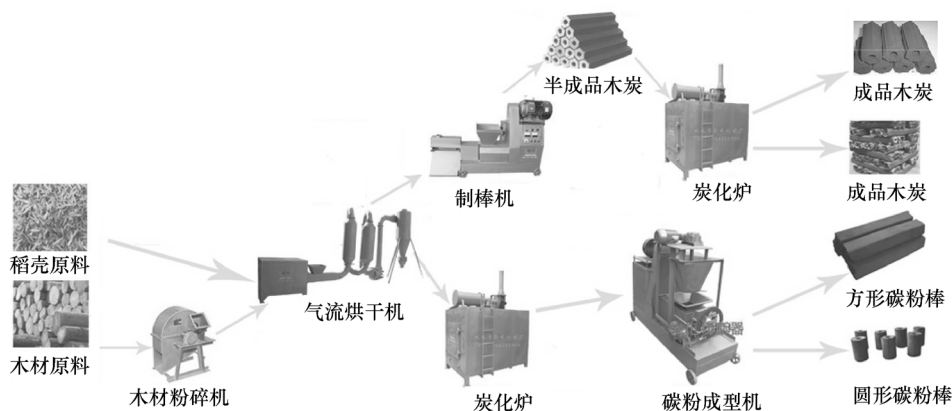


图 8-9 炭化成型工艺图

### 8.4.2 生物质固体成型工艺流程

生物质固体成型燃料的主要生产环节由于成型方式不同,生产工艺也有所不同。目前,生物质固体成型燃料主要包括两种生产系统,一是颗粒生产系统(见图8-10),二是压块生产系统(见图8-11)。颗粒生产系统主要由干燥、粉碎(除尘)、输送、收集、混合搅拌、输送、固体成型、切断、冷却、包装、入库等环节组成,压块生产的技术环节比颗粒生产的技术环节要简单一些,但是流程大体相同,各生产环节的基本功能如下所述。

(1) 干燥:利用太阳能或专门的烘干设备(如回转圆筒式干燥机)对原料进行干燥,将原料的含水率降低到10%~15%。两次以上粉碎之间插入干燥工序,以降低能耗,增加粉碎效果。

(2) 粉碎:利用粉碎机将原料粒度减小到成型所要求的粒度,并使原料尺寸均匀。

(3) 输送:将原料由粉碎环节输送到原料仓,同时在输送过程中还可以对原料进行风力烘干。

(4) 收集与混合搅拌:将原料暂时储存在原料仓内,由于仓内安装抄板,对原料进行搅拌与混合,保证喂料顺畅,使固体成型连续生产。

(5) 螺旋输送:保证初加工实现连续、均匀喂料。

(6) 固体成型:由生物质固体成型机将原料挤压成型,秸秆等生物质原料通过压缩成型,一般不使用添加剂,此时秸秆内的木质素充当了黏结剂。

(7) 切断:在固体成型机内装有切刀,将挤压出的固体成型燃料按照设计的尺寸切断,

便于储运。

(8) 冷却：从固体成型机生产出来的成型燃料温度一般为  $75^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ ，这种状态下的成型燃料易破碎、折断，不宜储藏和运输。空气不断从风机中排出，带走它的热量和水分，最终达到冷却的目的。

(9) 包装：对成型燃料成品进行计量、称重，实现机器包装。



图 8-10 成型颗粒



图 8-11 成型压块

## 8.5 生物质成型设备

### 8.5.1 主要成型设备

生物质固体成型设备主要分为螺旋挤压式成型机、活塞冲压式成型机和压辊式成型机三种类型。其中，螺旋挤压式成型机和活塞冲压式采用的是热压成型工艺，而压辊式成型机采用的是冷压成型工艺，压辊式成型机又分环模成型机和平模成型机。

#### 1. 螺旋挤压式成型机

螺旋挤压式成型机利用螺杆挤压生物质，靠外部加热，成型温度为  $150^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ ，使木质素、纤维素等软化，挤压生物质成棒状，成型燃料形状通常为直径  $50 \sim 60\text{mm}$  的空心燃料棒，成型燃料的长度可根据使用要求进行调节。螺旋挤压式成型机开发应用最早，是当前应用最为广泛的成型设备，它具有运行平稳、生产连续性好等优点，生产棒状成型燃料具有投资少，设备简单，容易操作等优点，存在螺杆磨损严重、使用寿命短以及单位产品能耗高的问题<sup>[2]</sup>。

螺旋挤压成型机主要由挤出螺旋、挤出套筒、加热圈组成，如图 8-12 所示。被粉碎的生物质原料在挤出螺旋的作用下被推入挤出套筒，在挤出套筒周围加热圈的作用下，生物质原料在挤出套筒内被加热到木质素软化状态并随生物质原料不断进入挤出套筒，由于受挤压及胶粘的共同作用使生物质成型。成型后的棒状燃料被源源不断地送出，燃料棒的长度可根据需要截断<sup>[8,9]</sup>。



螺旋挤压成型机在工作时生物质原料被送到螺旋压缩成型机械中（见图 8-13），在动力机械的带动下锥形螺杆推动原料进入压缩成型筒内，锥形螺杆和压缩成型筒挤压物料使内压应力越来越大，在压缩成型筒的顶端达到最大内压应力而成型，再经过一段应力松弛段，被推出螺旋压缩成型机械，成为成型物料。

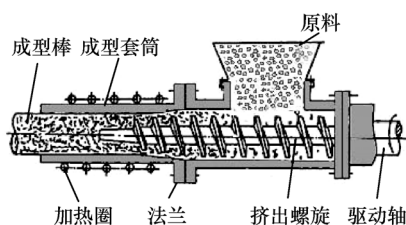


图 8-12 螺旋挤压成型机结构简图

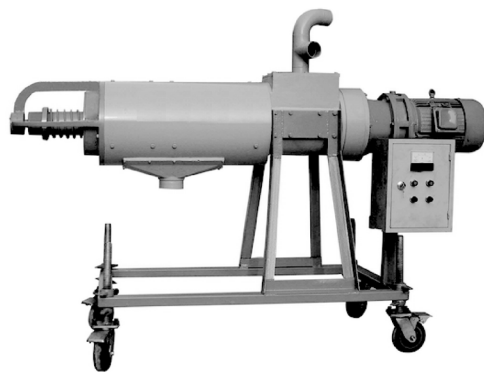


图 8-13 螺旋式压缩成型机

## 2. 活塞冲压式成型机

活塞冲压式成型机是靠活塞的往复运动实现成型的。根据驱动力的不同活塞冲压式成型机又分为机械驱动活塞式成型机和液压驱动活塞式成型机。活塞由液压或机械驱动做往复运动（见图 8-14），已粉碎的生物质原料在活塞的推动作用，在喉管处被挤压成型<sup>[10]</sup>。机械式冲压成型机依靠飞轮储存的能量带动冲压活塞；液压式冲压成型机是利用液压油缸所提供的压力，带动冲压活塞使生物质冲压成型。活塞冲压式成型机对原料的含水率要求较为宽松，常用于生产实心的燃料块或燃料棒，密度在  $800 \sim 1100 \text{ kg/m}^3$  之间，燃料块比较容易松散，在压缩过程中一般不需要加热。

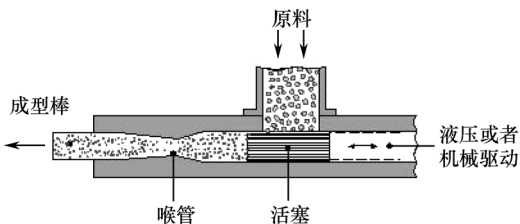


图 8-14 活塞式冲压成型机结构简图

活塞冲压式成型机与螺旋挤压式成型机相比，明显改善了成型部件磨损严重的问题，但成型物密度稍低，容易松散。由于存在较大的振动负荷，所以机器运行稳定性差，噪音较大，润滑油污染也较严重。

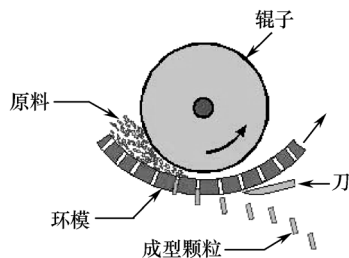


图 8-15 压辊成型机结构简图

## 3. 压辊式颗粒成型机

压辊式颗粒成型机的基本工作部件由压辊和压模组成。压模有圆盘形或圆环形两种，压模上加工有成型孔，原料进入压辊和压模之间，在压辊的作用下被压入成型孔内（见图 8-15）。燃料形状为圆柱形或棱柱形。

压辊式成型机主要用于生产颗粒状成型燃料，根据压模的形状不同可分为平模成型机和环模成型机（见图 8-16 和

图 8-17)。压辊式成型机其基本工作部件由压辊和压模组成，压辊可以绕自身的轴转动，压辊的外周加工有齿或槽，使原料压紧而不致打滑。压模上加工有成型孔，物料进入压辊和压模之间，在压辊的作用下被压入成型孔内，成型为圆柱形或棱柱形，最后切段成颗粒状成型燃料。压辊式成型机生产时，一般不需要额外加热，依靠物料挤压时产生的摩擦热即可使物料软化、黏合，若原料中木质素含量较低，可适量添加少许黏结剂。该设备对原料含水率要求较为宽松，一般在 10% ~ 40% 之间，颗粒成型燃料的密度在 1000 ~ 1400 kg/m<sup>3</sup> 之间<sup>[7]</sup>。



图 8-16 平模成型机



图 8-17 环模成型机

总体而言，螺旋挤压式成型机和活塞冲压式成型机一般生产棒状燃料，设备较小，生产率不高，一般 100 ~ 200kg/h，主要部件磨损非常严重，运行不十分稳定，不易实现批量化生产。模辊挤压式成型机一般生产块状或颗粒状固体成型燃料，块状燃料截面尺寸一般为 32×32mm，长约 50 ~ 100mm；颗粒燃料呈直径为 6 ~ 12mm 的圆柱状，高约 20 ~ 50mm。模辊挤压式中的环模式成型机生产率较高，为 1 ~ 2t/h 左右，成型燃料较均匀，适宜大规模生产；平模式成型机的生产率较环模式略低，易于中小规模生产。三种成型设备的优缺点如表 8-2 所示。

表 8-2 种成型设备的优缺点

设备	优点	缺点
螺旋挤压式成型设备	A 运行稳定，生产连续 B 成品密度高、质量好、可碳化、易燃烧 C 结果简单，设备投资少	A 能耗低，生产率低 B 螺旋杆易损件寿命短 C 对原料含水率要求高 D 设备配套性能差
活塞冲压式成型设备	A 成品密度高 B 对原料含水率要求不高	A 生产率不高 B 产品质量不够稳定 C 产品不适宜碳化 D 成型套易磨损
压辊式成型设备	A 生产率较高 B 不需要外部加热 C 对原料的含水率要求不高	A 成型模具及压辊易磨损，寿命短，材料要求高 B 对原料的适应性较差

目前，模辊挤压式成型机最受企业青睐，原因是它能够实现自动化生产，设备连续稳

定运行时间长,生产率高,且成型后的固体颗粒燃料质量高,相对均匀,可以实现工业化自动上料。

## 8.5.2 配套设备

配套设备的选用决定于工艺路线,以上文提到的生物质环模颗粒成型工艺路线为例,分别介绍粉碎、干燥和除杂工序的配套设备。

### 8.5.2.1 粉碎设备

原料粒度是影响成型的重要参数,粉碎是指通过挤压、研磨、撞击、锯切等方法将生物质粉碎到一定粒度范围。根据物料粉碎方式和粉碎手段的不同,粉碎机的种类繁多,依据物料性质的不同,需采用适宜的粉碎方式,以提高粉碎质量和效率,减少功耗。我国现有并投入生产的粉碎机主要有铡切式粉碎机、锤片式粉碎机、揉切式粉碎机和组合式粉碎加工机械等。

(1) 铡切式粉碎机又称为铡草粉碎机(见图8-18),其主要功能就是切碎物料的茎秆,例如玉米、水稻等农作物的秸秆。铡切式粉碎机的工作原理是利用动刀片与定刀片所产生的剪力,切断农作物的茎秆,达到粉碎的目的,具有结构简单、生产效率高等优点。但经测试,该设备铡切只可一定程度地提高秸秆采食量,不能提高消化率,仍存在较大浪费。



图 8-18 铡切式粉碎机

(2) 锤片式粉碎机是国内外各类粉碎机中使用率较高的类型之一(见图8-19)。锤片式粉碎机主要是通过利用高速旋转的锤片,对要粉碎的物料产生强大的冲击力进而达到粉碎物料的目的。锤片式粉碎机的工作原理是利用高速旋转的锤片转子连续打击农作物秸秆,此时被粉碎的物料以较高的速度撞击齿板与筛片,使其进行多次碰撞与摩擦,最终达到粉碎的目的。该粉碎机的主要特点是结构简单、适应性强、维修方便、粉碎质量好、生产能力强等,因此锤片式粉碎机能够得到广泛的使用。

(3) 揉切式粉碎机主要由揉搓机和揉碎机这两种机型构成(见图8-20)。①揉搓机主要由喂入装置、转子机构、齿板和风机等组件机构构成。揉搓机的工作原理是在粉碎机的凹板上安装能改变高度的齿板和定刀,且呈螺旋走向。当喂入的物料秸秆经高速旋转锤片的打击,并且沿轴向流动,物料达到一定的粉碎程度时,就会通过齿板空隙落入输送室并被输送机构输送收集。揉搓机可以将秸秆等揉搓成细丝状故而能够更好地提高粉碎物料的适用效果。但其缺点是加工的材料仅能达到破碎或细碎的状态,生产效率较低。②揉碎式粉碎是我国近年研发的一种新型加工方式,这种加工方式将铡切与粉碎结合起来,经揉碎机加工出来的物料,一般多呈现柔软蓬松的丝状,既能满足粉碎粒度要求,又极大地减少了营养成分的丢失。现阶段,该设备的适应性较差,不适于过湿、韧性大的物料,只适合加工含水率较低的秸秆。

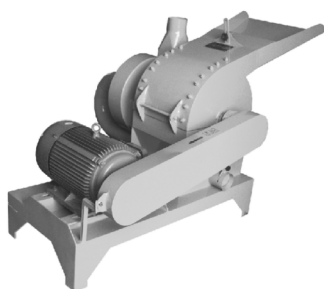


图 8-19 锤片式粉碎机



图 8-20 揉切式粉碎机

(4) 组合式粉碎加工设备综合了铡切、粉碎和揉搓等功能，是一种新型的粉碎加工方式。东北林业大学的汪莉萍等将现有稻秆加工机械的所有功能融为一体，即将切碎、粉碎、揉搓等功能融于一个设备中，设计出了复合式稻秆粉碎机。其将进料口处设计成自动进料装置，并在出料口处安装了风机设备，既提高了粉碎机的生产率，又保证了粉碎机的粉碎质量，同时在一定程度上减少了人力，降低了能耗。这种复合式稻秆粉碎机的特点是适应能力强，对高湿、潮性强的物料都可以加工，适用的范围比较广泛<sup>[11]</sup>。

### 8.5.2.2 干燥设备

原料成型前需要进行干燥、脱水，可分为自然干燥和人工干燥。自然干燥指利用太阳光照和自然风进行干燥。人工干燥是指利用高温气流在短时间内将物料进行脱水处理。生物质的含水率受自然环境的影响较大，为得到成型所要求的生物质含水率，必须采用干燥方法，使生物质迅速干燥达到压制生产要求的含水率。

常规干燥设备分为喷雾干燥机、流化床干燥器、气流干燥器（见图 8-21）、回转干燥器（见图 8-22）、传导干燥设备等。一般选用气流干燥器和回转干燥器。干燥是一个高能耗的操作单元，生物质原料的干燥温度一般在  $40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$  之间。

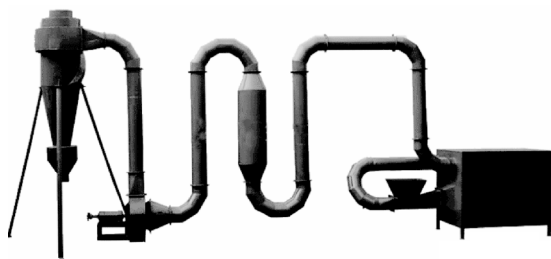


图 8-21 气流干燥器

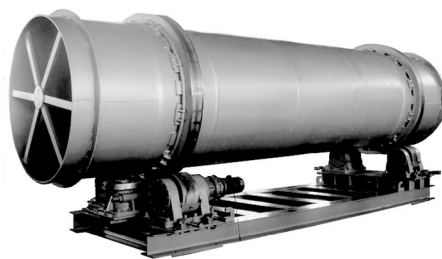


图 8-22 回转干燥器

### 8.5.2.3 除杂设备

我国生物质来源广泛，但原料中含有各种杂质，主要包括金属杂质、砂石杂质、泥土以及如绳子、线头等杂质。金属杂质、砂石杂质和泥土会造成生产线关键设备的磨损；绳子、线头等杂质会使物料的输送产生拥堵，影响物料输送的均匀性和平稳性。对于金属杂质可以采用磁石进行去除；绳子、线头等杂质，可以设计绞龙装置，使其缠绕其上，然后



定期清除；砂石杂质可以根据其物理特性与秸秆物理特性的不同，采用风选设备和振动分离的方法来去除。颗粒成型工艺中的成型产品直径一般是 6mm、8mm、10mm 三种规格，而块状成型产品直径一般不低于 25mm，颗粒成型对原料杂质含量要求，特别是对于砂石杂质的去除要求更为严格。利用物料与杂质的不同物理特性，根据不同杂物种类设计不同的工艺流程，有效地去除物料中的杂质，采用相应的机械和技术措施来分离杂质。如对于杂质中的含铁物品，可选择平板式除铁器、磁栅式除铁器或永磁滚筒（见图 8-23）等设备进行去除。对于砂石等杂质，根据物料摩擦特性的不同，应用振动筛（见图 8-24）或抖动板等设备，也可根据物料密度的不同采用风选法<sup>[12]</sup>。



图 8-23 永磁滚筒

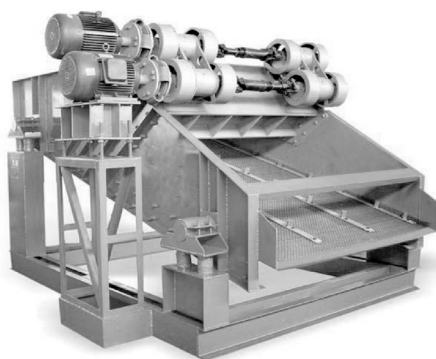


图 8-24 振动筛

## 8.6 生物质成型燃料的发展前景与挑战

经过几年的快速发展，我国生物质固体成型燃料技术已取得了显著的成就，但是与国外先进的成型技术相比还有一定的差距，主要表现在以下几个方面：

（1）生产率低，目前国产设备大部分的产量不到 1200 千克/小时，距离规模化生产的产量要求较大。

（2）能耗高，粉料在螺旋挤压成型前先要经过电加温预热，挤压成型过程每吨料电耗就在 90KW 以上。

（3）易损件寿命短，国产设备主要工作部件的最高寿命不超过 500 小时。

（4）原料要求苛刻，国内压块机一般要求原料含水率控制在 8%～12% 之间，高水分物料要进行预干燥处理，增加了加工成本<sup>[13]</sup>。

目前，还存在设备制造能力和技术研发能力相对薄弱问题，当前技术和设备较多依靠进口，同时对可再生能源资源评价、技术标准、产品检测、认证体系还不够完善，没有形成支撑可再生能源产业发展的技术服务体系，这些都有待于去深入研究探索、试验、开发。

我国幅员辽阔，各地区气候特点、资源禀赋和经济发展水平差异很大。生物质固体成型燃料技术及运行模式需要在不同地区进行技术适用性、工程应用模式以及综合配套技术



的完善。建议在全国的典型地区对不同原料、不同用途、不同运行模式的秸秆固体成型燃料技术进行试点,验证工艺和设备的可靠性、可行性及适用性,为下一步大面积推广提供技术支持和管理经验。此外,为消除生物质燃料规模化应用中原料收集、运输、储存成本高这一“瓶颈”,可大力发展便于在生物质原料产地推广使用成型设备。同时增加成型设备的基础研究,尽可能以常温固化成型技术为主,解决关键部件的材料磨损过快问题,降低成型时能量损耗,增加成型模具的使用寿命,降低成本。

生物质成型燃料能够代替化石燃料的燃烧,经过压缩成型后的生物质成型燃料其燃烧性能得到极大改善,其成型燃料的热值相当于普通中质烟煤,成型燃料完全可以代替煤用于锅炉,从大环境来看,随着能源紧张以及环境问题的日益严重,煤等化石燃料的价格还会不断攀升,这又为生物质成型燃料的应用创造了巨大的利润空间。此外,国家已经逐步取缔城镇小型燃煤锅炉,更为此项技术的应用推广创造了一定的价格空间<sup>[14]</sup>。

目前,我国生物质成型燃料开发利用正处于快速发展阶段,相关企业和科研单位研发的技术与设备为生产规模化奠定了基础。在我国未来的能源消耗中,生物质成型燃料将占有越来越大的份额,这项技术必将有着广阔的发展前景。

## 参考文献

- [1] 俞国胜,侯孟.生物质成型燃料加工装备发展现状及趋势[J].林业机械与木工设备,2009,37(2):4-8.
- [2] 谢启强.生物质成型燃料物理性能和燃烧特性研究[D].南京林业大学,2008.
- [3] 赵立欣,孟海波,姚宗路等.中国生物质固体成型燃料技术和产业[J].中国工程科学,2011,13(2):78-82.
- [4] 周春梅.生物质秸秆与残炭成型工艺及燃烧特性的试验研究[D].淄博:山东理工大学,2007.
- [5] 盛奎川,吴杰.生物质成型燃料的物理品质和成型机理的研究进展[J].农业工程学报,2004,20(2):242-245.
- [6] 景年盛.固态生物质燃料颗粒成型设备与技术的研究[D].哈尔滨工程大学,2012.
- [7] 简相坤,刘石彩.生物质固体成型燃料研究现状及发展前景[J].生物质化学工程,2013,47(2):54-58.
- [8] 尚耀先.秸秆环模成型机结构设计与环境力学分析[D].青岛科技大学,2013.
- [9] 俞国胜,侯孟.生物质成型燃料加工装备发展现状及趋势[C].2009全国木材加工技术与装备发展研讨会论文集.2009:16-21.
- [10] 尹玉婷.生物质成型影响因素及对辊式成型机设计研究[D].沈阳:东北大学,2011.
- [11] 姜新波,南亦博.秸秆锯切式粉碎机的设计研究[J].林业科技,2013,38(6):40-43.
- [12] 张林海,侯书林,田宜水等.生物质固体成型燃料成型工艺进展研究[J].中国农机化,2012,(5):87-91,100.
- [13] 肖宏儒,钟成义,宋卫东等.农作物秸秆平模压缩成型技术研究[J].中国农机化,2010,(1):58-62,66.
- [14] 付娅琦,睢利铭,杨北方等.生物质固体成型燃料的关键技术及可行性[J].农业装备与车辆工程,2011,(5):1-4.

第 9 章

生物质氢能源



氢是原子序数为 1 的化学元素，化学符号为 H，在元素周期表中位于第一位。其质子相对质量 1.00794，是最轻的，也是宇宙中含量最多的元素，约占据宇宙质量的 75%。氢能通常是指通过氢气和氧气反应所产生的能量。在化学史上，人们把氢元素的发现与“发现和证明了水是氢和氧的化合物而非元素”这两项重大成就，主要归功于英国化学家和物理学家卡文迪什（Cavendish H，1731-1810）。

氢是一种高热值燃料。燃烧 1 千克氢可放出 62.8 千焦的热量，热量相当于 3 千克煤油。氢氧结合的燃烧产物是洁净物质——水，没有任何污染。氢能既可以用作火箭、导弹的燃料，例如美国飞往月球的“阿波罗”号宇宙飞船以及我国发射的长征运载火箭，也可以用于民用领域作为汽车、飞机等的燃料，部分发达国家早在 1993 年就已经开发出以液氢为燃料的城市公共汽车。近十几年，快速发展起来的氢燃料电池也可直接应用于航天航海和陆地交通运输领域，氢能成为未来最有前途的新能源之一。

全球氢的年产量超过 4000 万吨，目前工业制氢的主要方法为从含烃的化石燃料中制氢和电解水制氢，其中绝大部分是从石油、煤炭和天然气中制取，这就得消耗本来就很紧缺的矿物燃料；自天然气大规模开采后，现在氢的主要制取原料为天然气。但天然气和煤都是宝贵的燃料和化工原料，其储备量有限，且制氢过程会对环境造成一定污染。另有 4% 的氢是用电解水的方法制取，但能耗大，成本高。而电解水制氢的效率约为 50% ~ 70%。

生物质主要由 C、H、O、N、S 等元素组成，其中氢元素的质量约占 6%，相当于每千克生物质理论上都可产生  $0.672\text{m}^3$  的气态氢，占生物质总能量的 40% 以上。氢的来源非常丰富，如果能充分利用生物质或微生物制取氢气，则可为取之不尽、用之不竭的清洁能源开发提供新途径。

## 9.1 氢能的特点和发展现状

### 9.1.1 氢能的特点

氢能源是一种洁净的二次能源，其主要优点有：燃烧热值高达 143MJ（氢是高能物质），每千克氢燃烧产生的热量，约为天然气（33MJ）的 4 倍，汽油（43MJ）的 3 倍，柴油（46MJ）的 3 倍，干木材（12.5MJ）的 11 倍，焦炭（25MJ）的 4.5 倍；氢的燃烧产物是水，被认为是世界上最清洁的能源；同时氢能的合成原料来源广泛，氢在地球上主要出现形式为化合态，是宇宙中分布最广泛的物质之一，它构成了宇宙 75% 的质量。

除高热值，氢能还具有以下特点：（1）氢气在一定压力和温度下也很容易变成液体，因而将它用铁罐车、公路拖车或者轮船运输都很方便；（2）氢气可以气态、液态或固态的方式进行存储；（3）运输方式灵活，可以采用地下管线、车载气罐或火车等进行长途运输；（4）氢能可以灵活高效地转化为其他形式的能量，如燃烧、电化学转换等。

## 9.1.2 国内外氢能源的发展状况

### 1. 国外氢能源发展

由于氢燃料所具有的一系列比较优势,其一直是各国减少碳排放和新能源研发“竞赛”的关注点,并得到各国政府大力扶持。20世纪50年代,美国利用液氢作超音速和亚音速飞机的燃料,使B57双引擎轰炸机改装了氢发动机,实现了氢能飞机上天。1957年,前苏联宇航员加加林乘坐人造地球卫星遨游太空和1963年美国的宇宙飞船上天,紧接着1968年阿波罗号飞船实现了人类首次登上月球的创举。这一切都依靠着氢燃料的功劳。随着制氢技术的发展和化石能源的缺少,氢能开始进入民用领域,包括氢能发电、氢燃料电池汽车以及氢燃料电池。

进入21世纪以来,世界上主要发达国家和相关国际组织都对氢能研发给予了高度的重视,制定了长期研发计划,并投入巨资开展氢能相关技术研发工作。2001年11月,美国召开了国家氢能发展展望研讨会,勾勒了氢经济蓝图。2002年,美国能源部建立了氢、燃料电池和基础设施技术规划办公室,提出了《向氢经济过渡的2030年远景展望报告》。2003年1月28日,美国总统布什宣布启动总额超过12亿美元的氢燃料计划,该计划的核心目的在于降低美国对国外石油的依赖,降低能源生产和使用后CO<sub>2</sub>的排放。欧盟将氢能作为其优先发展的领域,为了加强氢和燃料电池技术的研发与应用,2002年欧洲委员会成立了“氢和燃料电池技术高级工作组”,2008年欧盟制定了2020年氢能与燃料电池发展计划,在燃料电池和氢能研究、技术开发及验证方面投资近10亿欧元。2003年6月,日本经济产业省公布了《日本实现燃料电池和氢技术商业化的途径》,计划在2020年实现拥有燃料电池汽车500万辆和建成固定燃料电池系统10000MW,2030年实现拥有燃料电池汽车1500万辆和建成固定燃料电池系统12500MW<sup>[1]</sup>。

### 2. 我国氢能源发展

我国对氢能的发展可以追溯到20世纪60年代初,1961年,国防科委根据钱学森老先生的建议成立了140专业组,研究液氢在火箭上的应用问题。1962年6月,在国防部五院101站筹建液氢低温研究室,其主要任务是建立液氢生产车间(生产能力100升/小时)和相关的低温技术。

1966年,101站负责液氢生产车间的深冷液化设备系统调试成功,开始生产液氢,为我国“液氢”燃料的生产奠定了基础。2003年11月我国加入了“氢能经济国际合作伙伴”,成为首批成员国之一。我国新公布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》和《国家“十一五”科学技术发展规划》中都列入了发展氢能和燃料电池的相关内容。2008年,我国氢能标准技术委员会成立,负责制定各种各样的氢能国家标准,以保障我国氢能正常发展。2008年北京奥运会上,我国生产的2辆氢燃料电池大客车,20辆氢燃料电池小轿车,全程为北京奥运会服务。

氢能源经济是21世纪经济新的竞争领域和经济增长的转折点。目前,从氢的产量

上来讲,我国是产氢大国,氢气年产量已逾千万吨规模,位居世界第一,我国的鄂尔多斯建有世界最大的制氢工厂,利用煤来制氢,年产 20 万吨氢气。同时,我国也是世界最大的储氢材料产品国。中国和日本两国几乎包揽了世界金属储氢材料的生产。当前,我国在燃料电池、氢内燃机领域与欧美等发达国家存在一定差距,但我国发展势头强劲潜力。

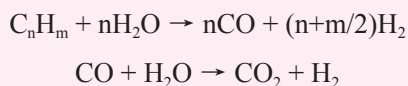
## 9.2 氢能的生产

随着氢气燃料电池、氢气内燃机技术的广泛使用和逐步推广,氢能的需求量逐年提高。目前,制备氢气的主要方法有石化燃料重整制氢、电解水制氢和生物产氢。石化燃料制取氢气工艺成熟,主要问题是氢气生产过程中易造成环境污染;水电解法制氢虽然对环境污染小,但制备过程需要耗用大量电力。生物产氢技术因具有低能耗、低成本、无污染和可再生等突出优势而引起世界广泛关注。生物产氢技术中能够将光能利用、氢能制备和有机物污染物去除进行结合,是一种极具发展潜力的氢能生产技术。随着科技的发展,利用生物质制取氢气将成为未来能源开发的方向。

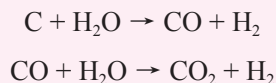
### 9.2.1 石化燃料制氢

利用含烃的石化燃料中制氢,这是至今采用最多的方法。它是以煤、石油或天然气等石化燃料作原料来制取氢气。

以烃为原料进行重整制氢,在有催化剂存在条件下与水蒸气反应转化制得氢气,基本反应过程如下:



以煤为原料制取含氢气体的方法主要有两种:一是煤的焦化(或称高温干馏),是指煤在隔绝空气条件下,在 900℃~1000℃制取焦炭,副产品为焦炉煤气。焦炉煤气组成中含氢气 55%~60%(体积)、甲烷 23%~27%、一氧化碳 6%~8%,每吨煤可得煤气 300~350m<sup>3</sup>;二是煤的气化,气化是指煤在高温常压或加压下,与气化剂反应转化为气体产物。气化剂为水蒸气或氧气(空气)。主要反应方程:



上述反应为吸热反应,反应过程中所需的热量可以从煤或天然气的部分燃烧中获得,也可利用外部热源。

天然气和煤储量有限,且制氢过程会对环境造成很大的污染。用它们来制氢显然摆脱不了人们对常规能源的依赖性并会破坏自然环境。



## 9.2.2 电解水制氢

电解水制氢是广泛使用的制氢技术，多采用铁为阴极面，镍为阳极面的电解槽（见图 9-1）来电解苛性钾或苛性钠的水溶液。水分子在阳极失去电子，被分解为氧气和氢离子，氢离子通过电解质和隔膜到达阴极，与电子结合生成氢气。该方法成本较高，但产品纯度大，可直接生产 99.7% 以上纯度的氢气。

反应方程为： $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 。

由于电解水效率低且需消耗大量的电能，因此使用常规能源生产的电能来进行大规模的电解水制氢成本较高。

电解制氢工艺的优点是过程简单，无污染，转化率高；缺点是消耗电量高，目前电解水的工艺、设备均在不断的改进，但电解水制氢能耗仍然很高，而且还有许多工艺问题需要解决，依靠这种方法来大规模制氢还需要一段研究过程。



图 9-1 电解槽

## 9.2.3 生物质制氢

目前，生物质制氢技术主要分为两类：一类是生物质原料通过热化学技术制取氢气；另一类是利用微生物途径转化制氢，如厌氧发酵法制氢、光合微生物制氢等。

### 9.2.3.1 生物质热化学制氢方法

生物质热化学制氢技术主要包括气化制氢、热解制氢、超临界水气化制氢、高温等离子体制氢等技术。

#### 1. 生物质热裂解制氢技术

生物质热裂解是指在温度为  $400^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 、压力为  $0.1 \sim 0.5\text{MPa}$ 、隔绝空气的条件下，间接加热生物质使其裂解，然后对热解产物二次催化裂解，使烃类物质继续裂解以增加气体中氢含量，再经过变换反应将一氧化碳、甲烷也转换为氢气，增加气体中氢的含量，最后采用变压吸附或膜分离技术进行气体分离得到纯氢。主要通过控制裂解温度、物料停留时间及热解气氛来达到制氢目的。由于热解反应不加空气，得到的是中热值燃气，燃气体积较小，有利于气体分离。

#### 2. 生物质催化重整反应制氢

除了热裂解产生的氢气外，还可以将生物质通过催化重整反应制氢（见图 9-2）。催化重整是指生物质经过高温裂解后生成的小分子组分与水蒸气在催化剂存在下发生水煤气变换反应生成富氢气体的过程。生物质催化重整反应主要包括两个步骤：一是生物质的快速热解转化为生物质热解油，二是利用热解油与水蒸气重整制备富氢气体。

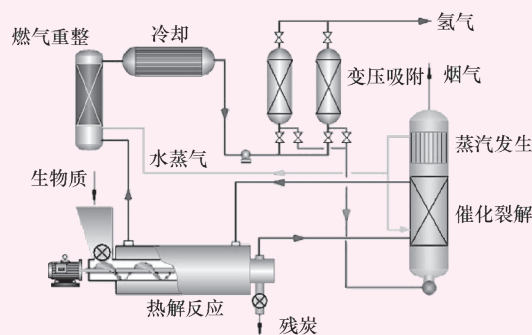


图 9-2 生物质重整制氢

3. 生物质气化制氢

生物质气化制氢是指生物质在高温下与气化介质发生热化学反应后，获得富氢气体的过程（见图 9-3）。生物质在气化介质中（空气、纯氧、水蒸气或这三者的混合物）加热至 700℃ 高温以上，生物质将分解为氢、一氧化碳和少量二氧化碳的混合气，然后进行变换反应使一氧化碳转变，获得更多的氢气，最后分离氢气。生物质气化制氢一般采用循环流化床或固定化流化床作为气化反应器，目前用于气化的催化剂有白云石、镍基催化剂、方解石和菱镁矿等。采用不同的气化剂，生成的可燃气体的成分及焦油含量不同。

生物质气化制氢技术与煤气化制氢有相似的技术路线，但生物质作为气化原料比煤作为气化原料更具优势，生物质中的硫含量和灰分含量较低，氢含量较高，特别是秸秆类生物质，固定碳在 20% 左右，挥发组分则高达 70% 左右，而煤的挥发分一般在 20% 左右，固定碳在 60% 左右，400℃ 时生物质中大部分挥发组分可分解释放，而煤在 800℃ 高温时才释放出 30% 的挥发组分；此外，生物质含硫量低，一般少于 0.2%，生物质在催化气化过程中不需要气体脱硫装置，降低了成本，又有利于环境保护。

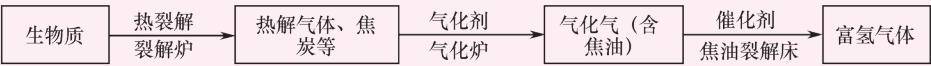


图 9-3 生物质热气化制氢工艺流程图

4. 生物质超临界转换制氢

超临界水气化制氢是一种新型、高效的制氢技术。生物质超临界转换制氢以生物质和水为原料，将生物质与一定比例的水混合后，在超临界条件下完成反应，产生含氢量高的气体和残炭，然后进行气体的分离得到氢（见图 9-4）。用超临界转换法制氢时，一般生物质的含水量应在 35% 以上，反应压力 22 ~ 35MPa，温度 450℃ ~ 650℃。在超临界水中进行生物质的催化气化，生物质的气化率可达到 100%，气体产物中氢气的含量可超过 50%，并且反应不生成焦油、木炭等副产品。由于超临界水气化所需的反应温度和压力对

设备材质要求较高，目前相关研究仅停留在实验室小规模研究阶段<sup>[4]</sup>。

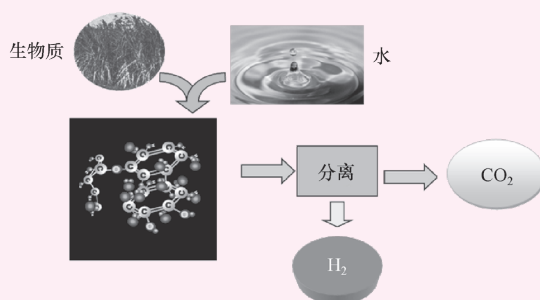


图 9-4 超临界水气化制氢

## 5. 高温等离子体制氢

高温等离子体制氢是指利用高温等离子将生物质热解制备氢气的过程。用等离子体进行生物质转化是一项完全不同于传统生物质转化形式的工艺，离子体其特点是温度极高，可达到上万度，生物质在氮的气氛下等离子体热解后，产品气中的主要组分就是 H<sub>2</sub> 和 CO。在等离子体气化中，可通过水蒸气调节 H<sub>2</sub> 和 CO 的比例，实现制氢的目的，该技术最大的问题是能耗很高。

### 9.2.3.2 微生物法制氢技术

在 19 世纪，人们就发现了藻类和光合细菌具有产生分子氢的特性，微生物法制氢是指利用微生物的代谢活动来生产氢气的方法，该过程可在常温常压下进行，具有反应条件温和的特点，能妥善解决能源与环境的矛盾。目前关于微生物法制氢的研究主要集中在光合微生物制氢、藻类制氢以及厌氧发酵制氢。

#### 1. 光合细菌制氢

光合细菌是地球上出现最早的具有光能合成系统的原核生物，产氢是光合细菌调节其机体内剩余能量和还原力的一种方式。在光合细菌内参与氢代谢的酶有两种：固氮酶和氢酶，光合细菌主要利用固氮酶产氢。蓝细菌作为一种典型的光合细菌，其产氢方式主要有固氮酶催化产氢和氢酶催化产氢两种产氢机制。

固氮酶是一种能够将分子氮还原成氨的酶，由铁蛋白和钼铁蛋白组成。只有钼铁蛋白和铁蛋白同时存在，固氮酶才具有固氮的作用。固氮过程必须是在严格的厌氧微环境中进行。因为钼铁蛋白和铁蛋白，对氧极端敏感，一旦遇氧就很快导致固氮酶的失活。固氮过程中固氮酶能催化还原氮气成氨，同时获得氢气。

氢酶是一种含有金属的蛋白，主要负责调节氢代谢，可以分为镍-铁氢化酶和铁-铁氢化酶，前者活性中心由一个 Fe 原子和一个 Ni 原子组成，而铁-铁氢化酶活性中心由两个 Fe 原子组成，氢化酶能够催化质子与氢气的相互转化。

如图 9-5 所示，在光照条件下，光合细菌通过固氮酶将  $N_2$  转化成  $NH_3$ ，在这个过程中，质子转化生成  $H_2$ 。总体而言，利用光照产氢受到光照强度和光照时间的限制，产氢效率较低，产氢过程稳定性较差；在黑暗条件下，光和细菌主要依赖氢酶产生氢气，光合细菌以有机物（葡萄糖、有机酸、醇类）为底物，在氢酶代谢过程中产生氢气（见图 9-6）。

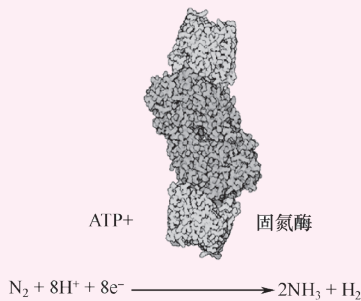


图 9-5 固氮酶及其作用机理

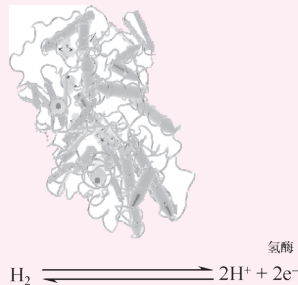


图 9-6 氢酶及其作用机理

## 2. 藻类制氢

1939 年 Gaffron 在《Nature》上发表论文，介绍了斜生栅藻（*Scenedesmus obliquus*）（见图 9-7）具有在厌氧、光照条件下产氢的能力，首次发现了藻类具有产氢的特点。绿藻是目前研究较多的用于光解水制氢的藻类，如图 9-8 所示，它含有两个光合系统（PS I 和 PS II），氢代谢主要由氢酶调节。其产氢方式有两种：一是光解水制氢，以太阳能为能源，以水为原料，通过光合作用及其特有的产氢酶系，将水分解为氢气和氧气；二是由内源性底物分解产生的电子，电子流向氢化酶进而产生  $H_2$ 。

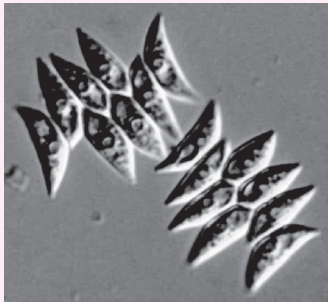


图 9-7 斜生栅藻

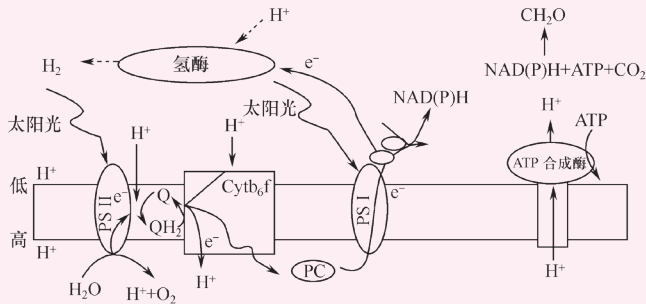


图 9-8 藻类光解水产氢过程电子传递示意图

总体而言，光合生物制氧的产氢能力低下、产氢稳定性不高，产氢条件限制因素多等问题限制光合生物技术的发展。

## 3. 厌氧细菌发酵制氢

厌氧细菌发酵制氢是指在黑暗、厌氧条件下，通过微生物发酵作用，将有机物分解为挥发性脂肪酸、醇类等液体产物，同时释放二氧化碳，产生氢气的过程。

一些专性厌氧和兼性厌氧微生物具有厌氧产氢的能力，如丁酸梭菌、埃氏巨球菌、大

肠杆菌、产气肠杆菌、揭球固氮菌等。厌氧发酵制氢的过程是在严格的厌氧条件下进行，在发酵制氢过程中，厌氧细菌利用固氮酶或氢化酶将底物分解制取氢气。主要底物包括甲酸、丙酮酸、短链脂肪酸以及糖类有机物，同时硫化物也能作为反应底物。与前文介绍的光合细菌产氢、藻类产氢不同，厌氧发酵制氢无需光源，而且产氢过程不受天气、温度的影响，是一种持续稳定的产氢方法，由于发酵制氢可以借鉴成熟的发酵装置和发酵技术，较生物光解制氢来说，生物发酵法制氢更容易实现规模化的生产。

厌氧发酵制氢过程中，细菌产氢主要通过两条途径：一条是丙酮酸脱羧产氢，另一条是通过 NADH 平衡调节途径产氢。

### (1) 丙酮酸脱羧途径产氢

依据电子供体的不同，丙酮酸脱羧产氢分为丙酮酸脱羧途径和丙酮酸甲酸裂解途径<sup>[5]</sup>。在前一条反应途径中，丙酮酸在丙酮酸脱氢酶的催化作用下发生脱羧，形成硫胺素焦磷酸—酶复合物，电子转移给还原态的铁氧还蛋白，还原态的铁氧还蛋白在氢酶的作用下被重新氧化成氧化态的铁氧还蛋白，同时生成分子氢（见图 9-9）。在后一条途径中，通过糖酵解途径生成丙酮酸后，丙酮酸在丙酮酸-甲酸裂解酶催化下，裂解生成乙酰 CoA 和甲酸，生成的甲酸分子在细胞色素类电子载体和铁氧还蛋白的辅助下，经丙酮酸甲酸裂解酶催化裂解，生成分子氢和二氧化碳（见图 9-10）。通常甲酸分解产氢是通过兼性厌氧细菌在甲酸氢化酶的催化作用下生成氢气，反应方程式： $\text{HCOOH} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$

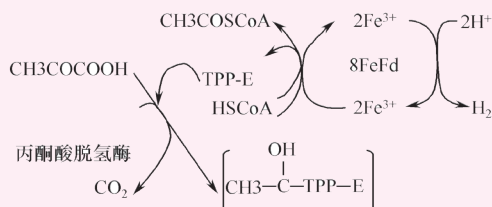


图 9-9 丙酮酸脱羧途径产氢

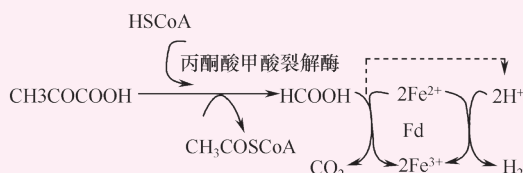


图 9-10 丙酮酸甲酸裂解途径产氢

### (2) NADH 平衡调节途径产氢

NADH 途径产氢是通过 NADH 的再氧化来实现的，即细胞通过磷酸己糖途径利用葡萄糖获得大量 NADH，为了避免细胞中 NADH 和  $\text{H}^+$  的积累，在 NADH-铁氧还蛋白和铁氧还蛋白-氢酶作用下，发酵细菌可以通过释放  $\text{H}_2$  的方式将过量的 NADH 和  $\text{H}^+$  氧化，而保证代谢的正常进行，同时产生氢气。反应方程式： $\text{NADH} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2 + \text{NAD}^+$ 。

在菌体利用糖类转化氢气的过程中，菌体首先将糖类转化为丙酮酸，然后通过一系列酶促反应将丙酮酸最终转化为低分子有机酸和醇类。根据丙酮酸最终的去路不同，厌氧发酵产氢途径又分为丁酸型发酵、乙酸型发酵、乙醇型发酵、混合型发酵等产氢途径。例如，梭状芽孢杆菌属利用糖类（葡萄糖、蔗糖、乳糖、淀粉等）发酵产氢，反应类型以丁酸型发酵为主，发酵产物除了产生氢气，还会生成丁酸、乙酸、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}_2$  和少量的丙酸，如图 9-11 所示。



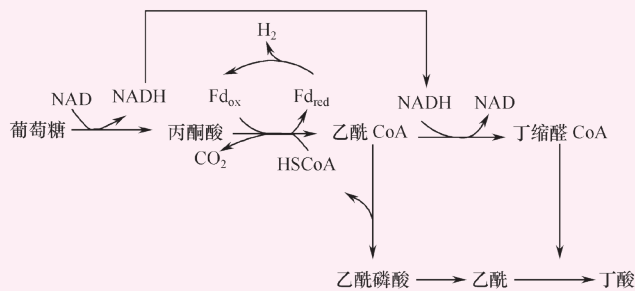


图 9-11 丁酸型发酵途径

乙醇型发酵与传统的乙醇发酵不同，传统的乙醇发酵没有氢气产生，而乙醇型发酵产生乙醇和乙酸的同时有大量的氢气产生，主要末端发酵产物为乙酸、乙醇、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$  以及少量丁酸，如图 9-12 所示<sup>[6]</sup>。

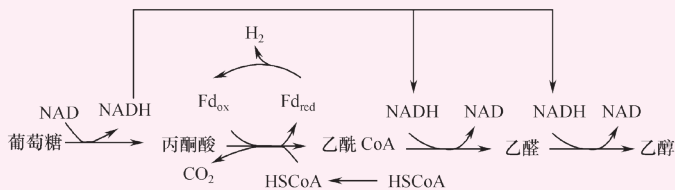


图 9-12 乙醇型发酵途径

综上所述，厌氧发酵产氢具备以下优势：①发酵产氢细菌的单株产氧量高于光合产氧细菌；②发酵产氢细菌可利用的底物范围广，可利用很多如食品废弃物、生活污水等有机污染物进行发酵产氢，实现了废弃资源再利用，大大降低了发酵产氢的生产成本；③发酵法生物制氢不受天气制约，在有光和无光的条件下均可实现连续产氢，保证了发酵产氢反应运行的稳定性。

### 9.3 氢能的储备和利用

氢气的储存是氢能利用的关键，储氢技术按氢的聚集状态可分为高压气态储氢、低温液态储氢以及固体合金储氢材料储氢。

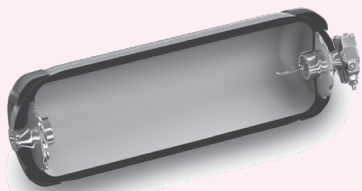


图 9-13 丰田 Mirai 高压储氢罐剖面图

#### 1. 高压气态储氢

在常压下氢气的密度为  $0.08988\text{g/L}$ ，体积能量密度低，高压压缩可提高氢气能量密度。高压气态储氢是一种应用广泛、简便易行的储氢方式。普通高压气态储氢具有成本低，充放气速度快的特点，在常温下就可以进行。图 9-13 为丰田 Mirai 使用的高压储氢罐，该储氢罐为碳纤维强化塑料的三层结构，可以承受 70 兆帕的高压。

## 2. 低温液态储氢

低温储氢是一种提高氢气能量密度、压缩氢气体积的储氢方式。低温液态储氢适用于储存空间有限的运载工具上，如航天飞机、汽车以及洲际导弹等。将气态氢降温到 $-253^{\circ}\text{C}$ 变为液体进行储存，只有极好的绝热装置来隔热，才能防止液态氢不会沸腾气化。从质量和体积上考虑，液氢储存是一种极为理想的储氢方式，但由于氢气液化要消耗很大的冷却能量，液化 $1\text{kg}$ 氢需耗电 $4\sim 10\text{kWh}$ ，大大增加了储氢成本；此外，由于液氢储存难度大，容易导致液态氢的气化损耗，因而其储存成本较贵，开发高度绝热的储氢容器是目前研究的重点。

## 3. 固体合金储氢

储氢合金是重要的固体储氢材料，主要有钛系储氢合金、锆系储氢合金、铁系储氢合金及稀土系储氢合金。这类材料具有很强的捕捉氢的能力，在一定的温度和压力条件下，储氢合金能够大量“吸收”氢气，反应生成金属氢化物，同时放出热量。对金属氢化物进行加热后，它们又会分解，将储存在其中的氢释放出来。由于储氢合金都是固体，既不用储存高压氢气所需的大而笨重的钢瓶，又不需存放液态氢那样极低的温度条件，图9-14为HBank固态储氢器，需要储氢时使合金与氢反应生成金属氢化物并放出热量，需要用氢时通过加热或减压使储存于其中的氢释放出来，如同蓄电池的充、放电非常便利，不足之处在于储氢合金容易发生中毒，反复使用后吸附能力会出现下降。储氢合金在一定的条件下可以可逆地吸放氢，从而避免了高压和低温所带来的技术难题以及经济问题，研究更安全、高效的固体储氢材料的制备及吸放氢性能成为储氢技术未来的主要发展方向<sup>[7]</sup>。



图9-14 HBank 固态氢储氢器

氢能可转化为其他形式的能量，在氢能利用上分为两大类：

### (1) 直接将氢作为高热值燃料进行燃烧利用

①氢能发电：无论是水电、火电或核电发电站都是通过电网将电输送给用户。但是各种用电户的负荷不同，会出现用电高峰和用电低谷。为了调节峰荷，电网中常需要启动快、比较灵活的发电站供给电能，氢能发电最适合扮演这个角色。氢能发动机机组由火箭型内燃发动机配与发电机组成，它不需要复杂的蒸气锅炉系统，因此操作简单，维修方便，启动迅速，要开即开，欲停即停。2012年，美国氢能发电占比为7.9%，比例位于火力发电、水力发电和核电之后。目前，我国火力发电仍是电力市场的最主要部分，氢能发电还需要不断推进。

②氢燃料交通工具：氢燃料交通工具是指以氢为主要能量驱动的汽车。氢燃料内燃机工作原理和点燃式内燃机相同，无需对汽油发动机作多大的改进。由于氢气燃烧后的产物

为水蒸气，避免了发动机叶片上的油泥沉积，大大减轻了高温腐蚀，可以减少维护费用并延长发动机的寿命。图 9-15、图 9-16 为加氢站，用氢作为汽车燃料，燃烧热值高，每千克氢燃烧后的热量，约为汽油的 3 倍，低温下容易启动，清洁干净而且对发动机的腐蚀作用极小，延长了发动机的使用寿命。此外，由于氢气与空气能够均匀混合，完全可省去一般汽车上所用的气化器，从而可简化现有汽车的构造。



图 9-15 西班牙萨拉戈萨加氢站



图 9-16 奥地利维也纳 OMV 加氢站

③火箭燃料运载工具：氢具有密度小，热值高的特点，是大推力火箭的重要燃料。氢氧火箭发动机以液氧—液氢作为推进剂，由涡轮将推进剂增压到预定压力后送入燃烧室燃烧，产生高温高压的气体，通过喷管转换成为推力，推进火箭加速飞行。目前美、俄、日、欧都生产了大推力氢氧发动机型号，其最大推力在 100 吨以上，美国的 SSME 引擎甚至达到了 213 吨之多，美国研制之中的 RS-68 型大推力氢氧发动机推力更是达到 338 吨。我国长征五号运载火箭芯二级氢箱首次在中国航天科技集团公司六院 101 所低温综合试验区成功进行了液氢工况低温静力试验。长征五号作为我国全新研制的新一代运载火箭（见图 9-17），也是我国目前运载能力最大的运载火箭，其工程研制的总体技术指标位居亚洲第一、世界前三，工程研制跨度、技术难度以及任务实施规模在我国运载火箭研制史上均属首次。此次用于试验的长征五号运载火箭芯二级产品，直径 5 米，使用无毒无污染的液态氧和液态氢作为火箭发动机推进剂。

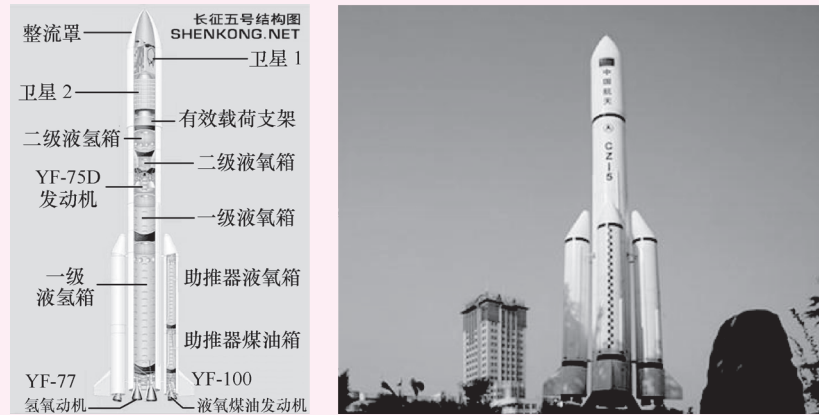


图 9-17 长征五号运载火箭

## (2) 利用开发氢燃料电池

燃料电池技术是氢能利用技术中最有前途的技术方向之一，该技术不需要进行燃烧，依靠电化学反应将氢转化直流电，实现了氢能的高效、便捷的利用。氢燃料电池早在 20 世纪 60 年代就因其体积小、容量大的特点而成功应用于航天领域。进入 70 年代后，随着技术的不断发展进步，氢燃料电池也逐步被运用于发电和汽车领域。氢燃料电池是一种将氢和氧的化学能通过电极反应直接转换成电能的装置。这种装置的最大特点是由于反应过程中不涉及到燃烧，因此其能量转换效率不受“卡诺循环”的限制，其能量转换率高达 60% ~ 80%，实际使用效率则是普通内燃机的 2 ~ 3 倍<sup>[8]</sup>。燃料电池的运作原理如图 9-18 所示：氢电池含有阴阳两个电极，分别充满电解液，而两个电极间则由具有渗透性的薄膜所构成。氢气由燃料电池的阳极进入，氧气则由阴极进入。经由催化剂的作用，使得阳极的氢分子分解成两个质子与两个电子，其中质子被氧“吸引”到薄膜的另一边，电子则经由外电路形成电流后，到达阴极。在阴极催化剂作用下，质子、氧发生反应形成水分子，是燃料电池唯一的排放物<sup>[9]</sup>。由于燃料电池是经由利用氢与氧的化学反应产生电流及水，不但完全无污染，也避免了传统电池充电耗时的问题，是目前最具发展前景的新能源方式，如能普及并应用在车辆及其他高污染的发电工具上，将能显著减轻空气污染及温室效应。

汽车排放尾气中夹杂大量有毒气体（二氧化碳、一氧化碳、碳氢化合物、苯和悬浮颗粒）。氢燃料电池则具有零排放、高效率特点，此外，与柴油发电机相比，氢燃料电池具有噪声小、维修简单等优点。目前多家汽车供应商已将氢燃料电池列入计划，2015 年 1 月，全球首辆量氢燃料电池汽车丰田 Mirai 在日本交货（见图 9-19），这款汽车最高时速可达到 178 公里，从启动到提速到 100 公里 / 小时仅需 9.6 秒，加氢一次可行驶大约 482 公里。

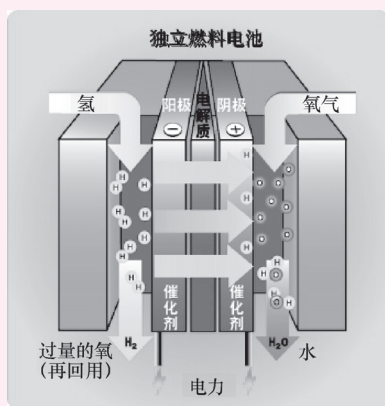


图 9-18 氢燃料电池

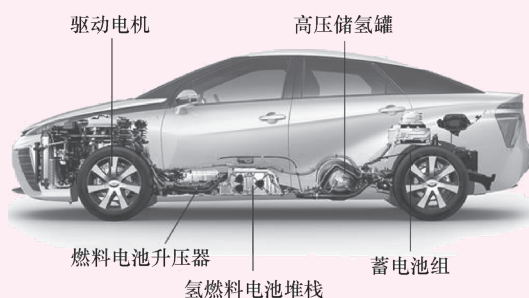


图 9-19 氢燃料电池车

## 9.4 生物制氢存在的问题及展望

从国内外生物制氢技术的研究现状看，利用微生物产氢尚处于研究探索阶段，生物法

制氢连续稳定运行的周期较短,离规模化生产尚有一定距离,现阶段仅限于实验室研究。随着关键技术的突破,利用微生物生产清洁燃料将具有广阔前景。

在探索利用微生物生产氢气的道路上,需要不断寻找产氢能力高的各种微生物,深入研究微生物产氢的机理,完成天然菌种的人工驯化。此外,随分子生物学技术的发展,利用基因工程手段进行产氢菌株改造成为另一条重要途径,在此基础上,设计出相应的大规模生产装置系统,达到高产、稳产、低成本三项指标,推进生物制氢工业化革命的到来。

长期以来,煤炭、石油等矿物燃料的大量、广泛使用,对全球环境造成严重污染,新型清洁能源的开发和应用是大势所趋,氢能作为理想的清洁能源,具有巨大发展潜力,并将以其优异的使用性能在未来能源领域中扮演重要角色。生物制氢既能解决生物质有效利用问题,又可改善生态环境,还可以缓解工业高纯氢的紧张需求。因此,无论是从能源角度还是从环境角度看,发展生物制氢技术都具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 刘芸.绿色能源氢能及其电解水制氢技术进展[J].电源技术,2012,36(10):1579-1581.
- [2] 王静怡.哈尔滨产乙醇杆菌模式菌株 YUAN-3 Sau3A I 与 Pst I 酶切基因组文库的构建[D].哈尔滨工业大学,2008.
- [3] 宋厉芸.高效发酵产氢菌的筛选及产氢研究[D].天津科技大学,2010.
- [4] 贤晖.金属掺杂的 C12A7-O 催化裂解生物油制取氢气的研究[D].合肥:中国科学技术大学,2005.
- [5] 朱艳艳.光合生物制氢过程中微生物菌群特性研究[D].郑州:河南农业大学,2013.
- [6] 刘飞,方柏山.微生物产氢机理的研究进展[J].工业微生物,2007,37(3):58-62.
- [7] 邵栋.氢能源——二十一世纪的能源[J].广州化工,2010,38(1):54-55,58.
- [8] 钟文琪,钟史明.燃料电池电厂前景展望[J].电力技术经济,2002,(3):29-31.
- [9] 刘飞.燃料电池电动汽车驱动系统选型及仿真研究[D].武汉理工大学,2006.



第 10 章

生物航空燃料



煤油是轻质石油产品的一类，其主要成分是不同的馏分的烃类化合物。作为三大成品油之一，煤油又分为航空煤油和灯用煤油两种，其中航空煤油是煤油的最主要品种，目前约占煤油产量的 95% 左右<sup>[1]</sup>。

生物航空燃料（见图 10-1）是指以动植物油脂或农林废弃物等生物质为原料，采用加氢法或费托合成技术生产的航空燃料。其基本性质与传统石油燃料相似，部分指标甚至优于传统航空煤油，生物航空煤油与石化航空煤油调和后可满足航空器动力性能和安全要求，可直接投入使用，无需制造商重新设计引擎或飞机。目前，生物航空煤油主要经过转化后作为调合成分，按 1% ~ 50% 的体积比与传统化石航空煤油调合后使用。

与地面交通运输工具有别，飞机在新燃料的选择方面有很大局限。在相当长一段时期内，由于技术原因，很多新能源如电能、太阳能、氢能、核能等均无法用于商业飞机。目前，航空业能选择的可替代能源只有生物液体燃料。动植物油脂或农林废弃物等原料来源广泛、可再生，其化学结构与石化航煤类似，可以直接替代传统的航空煤油，由于航空生物煤油的使用不需要重新设计引擎，航空公司和机场也无需开发新的燃料运输系统，航空生物煤油是石化航空燃料最具潜力的替代品。

所谓航空燃油是指专门为飞行器使用而设计的燃油品种，可分为两大类：第一类是航空汽油，其主要成分为碳链长度为  $C_5 \sim C_8$  的短链碳氢化合物，航空汽油用于装有活塞式发动机的飞机上，如通信机、气象机等小型飞机；另外一类是航空煤油，主要成分为  $C_8 \sim C_{16}$  的直链 / 支链的烷烃、烯烃、芳香烃和环烷烃等中链烃分子，用于装有航空燃气涡轮发动机和冲压发动机的飞机使用，是航空工业和民航事业中飞机的主要燃料。



图 10-1 生物航空燃料

## 10.1 生物航空燃料的发展背景

### 10.1.1 生物航空燃料的试飞和商业运营

巴西是航空领域最早使用生物燃料的国家。早在 2004 年，巴西航空工业公司制造了以生物乙醇为燃料的“伊帕内玛”型农用飞机，成为世界上第一种批量生产、使用生物燃料的飞机。2010 年，一架空客 A320 飞机从里约热内卢起飞，在大西洋上空飞行 45 分钟

后安全返回，这是巴西及拉美地区首次利用生物燃料进行试飞。

一些欧美国家从 2008 年起陆续开展了生物航空煤油的研究和试验飞行。2008 年至 2011 年，英国维珍航空公司、美国大陆航空公司、德国汉莎航空公司、法国航空公司、荷兰皇家航空公司等多家航空公司在大型客机上尝试使用生物航煤。2008 年 2 月 24 日，维珍航空率先以波音 747-400 飞机进行了用生物燃料驱动，成为全球首个使用生物燃料驱动的客机，原料作物是椰子油和巴西棕榈油。2011 年 4 月起，德国汉莎航空公司在—架往返于法兰克福与汉堡的空客 A321 型客机上使用生物混合燃料，其中的一个引擎装有各占 50% 的生物燃料和常规燃料。荷兰皇家航空公司采用餐饮废油提炼生物燃料，并于 2011 年 9 月首次使用生物燃料进行商业飞行，机型为波音 737，航线是从阿姆斯特丹到巴黎。英国汤普森航空公司 2011 年 10 月成功推出由英国伯明翰飞往西班牙兰萨洛特的“餐饮废油航班”。2011 年 10 月，法国航空公司首次利用生物航空煤油进行商业航班试飞，由空中客车 A321 型客机完成，飞机从法国西南部城市、空客总部所在地图卢兹出发，经 1 个多小时飞行抵达巴黎奥利机场。

此外，欧洲宇航防务集团 2010 年 7 月在德国柏林成功完成了钻石 DA42 飞机的首航，飞机使用的不是常规航空煤油，而是海藻生物航空燃料，说明生物航空燃料是能够替代常规化石航空燃料的。除民用领域外，生物航煤的性能在军用飞机上也进行了验证，2010 年 3 月 25 日，美国空军在佛罗里达州的空军基地用 A-10 雷神飞机，使用 50 : 50 亚麻荠生物航空燃料与 JP-8 常规航空燃料的混合油成功完成试飞。

商业运营方面，2011 年，德国汉莎航空公司成为全球首家在日常运营中使用生物燃料的航空公司，截至 2012 年 1 月 17 日，德国在汉莎航空公司法兰克福和汉堡总计 1187 架次航班中使用了生物燃料<sup>[2]</sup>。芬兰 Neste Oil 公司和德国汉莎航空公司的航空生物燃料试验报告结果表明，在飞机的燃料系统中，没有检测到任何损坏或腐蚀的迹象，而且长期存储未显示对燃料质量有任何负面影响，相比常规石化航空喷气燃料，可降低 1% 燃料消耗。

### 10.1.2 生物航空燃料的投产情况

目前，国际石化巨头以及欧美大国纷纷投入到生物航煤的研发、生产之中，并形成了规模化的生产。

#### 1. 国外生物航空燃料的发展

国外已有公司开发出多种生物航空燃料生产工艺。芬兰耐斯特油品公司（Neste）2003 年最先提出了通过脂肪酸加氢脱氧和临氢异构化制备生物柴油的方法，2007—2011 年，该公司已建成 4 套装置，年产航空生物燃料 30 万吨。Neste 石油公司投资 1950 万美元在芬兰建设的生物航空燃料和可再生柴油示范装置并于 2010 年投产。该装置以木材及其废弃物等为原料，先通过气化工序生产合成气，再通过费托合成工序生产合成油，最后

通过加氢改质工序生产生物航空燃料。法国道达尔公司（Total）与德国伍德（Uhde）公司合作开发的生物航空燃料项目于 2009 年启动，该项目采用伍德公司开发的气化技术，以生物质为原料生产合成气，然后通过费托合成法生产合成油，最后通过加氢改质生产生物航空燃料。目前正在建设中型装置有 2 套，一套建在道达尔公司的生产基地，另一套建在法国的农业区贡比涅（Compiègne）<sup>[3]</sup>。

生产生物航空燃料主要有加氢精制和费托合成途径。加氢精制生产生物航空燃料工艺，具有代表性的是美国环球油品公司（UOP）公司以及合成油 Syntroleum Corporation 公司的 Bio-Synfining<sup>TM</sup> 工艺（见图 10-2）。两种工艺均以动植物油脂为原料，生产出的航煤与常规喷气燃料碳数分布基本相同。美国环球油品公司在成功开发 Ecofining 技术的基础上，又开发出多种航空生物燃料的工艺，2008 年在休斯顿建成加工能力为 8000 t/a 的示范装置，已批量生产满足 ASTM D7566 标准要求的航空生物燃料，为多家航空公司和美国空军提供了试飞燃料。

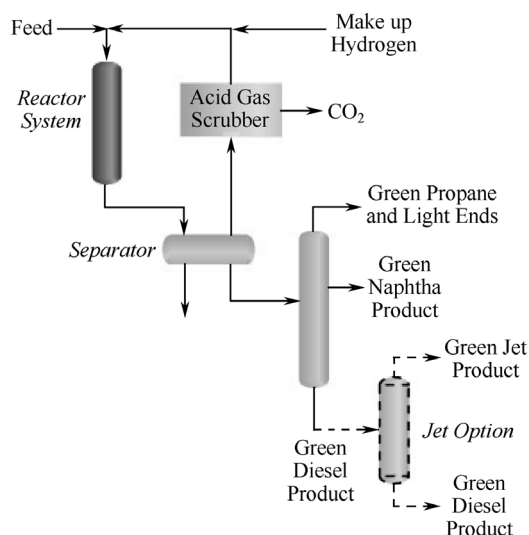


图 10-2 美国环球油品公司（UOP）Ecofining<sup>TM</sup> 技术生产生物航煤流程图

美国 Solena 生物燃料公司与英国航空公司合作，以农林废弃物为原料，采用气化 - 费托合成工艺制备生物航空燃料，并在伦敦东部建设欧洲第一套生物质合成航空生物燃料装置。Solena 集团解决方案的核心是其专利的 Solena 等离子气化（SPG）技术，该技术以生物质为原料，通过高温处理后生产合成气，再通过费托合成生产合成油，最后通过加氢改质生产生物航空燃料，同时生产石脑油和电力。该装置每年可将 50 万吨的生物质转化成 1600 万加仑航空生物燃料。

德国科林（Choren）工业公司投资建设的生物航空燃料示范装置位于德国弗赖贝格，以木材及其废弃物为原料，先通过气化生产合成气，再通过费托合成工艺用合成气生产合成油（2010 年开始生产合成油），最后通过加氢技术生产生物航空燃料。

除了上述国家外，泰国和马来西亚的建设工作也已经启动。

## 2. 我国生物航空煤油的发展

中国石化自 2009 年开始研发生物航煤技术, 2011 年中国石化杭州炼油厂改造建成了一套工业示范装置及调和设施, 并成功进行了生物航空煤油的工业试验。2010 年 5 月 26 日, 中国石油与中国国航、波音公司等联合签署了《关于中国可持续航空生物燃料验证试飞的合作备忘录》, 于 2011 年在中国进行首次航空生物燃料的飞行演示。2011 年 10 月 28 日, 国航成功完成了中国首次生物航空燃料的试飞, 一架国航 747 飞机在北京上空进行了验证飞行, 燃油由霍尼韦尔环球油品公司 (Honeywell UOP) 提供, 燃油由航空生物燃料与标准航空石油燃料按照 50 : 50 的比例调和而成, 试飞持续近 1 个小时, 标志我国开始迈入了绿色喷气机时代。2012 年 2 月 28 日, 中国民用航空局在北京举行中国石化 1 号生物航空煤油适航审定申请受理仪式, 正式受理中国石化研发的 1 号生物航煤适航审定申请。2013 年 4 月 24 日中国自主研发生产的以 1 号生物航煤为燃料的商业客机在上海首次试飞成功。2013 年 4 月 24 日 5 点 43 分, 加注中石化生物航空煤油的东方航空空客 320 型飞机经过 85 分钟飞行后, 平稳降落在上海虹桥国际机场, 试飞组按照验证飞行科目设置的全流程要求, 对混合生物燃油加注配比、巡航阶段温度测定、飞行高度影响、航前航后发动机孔探检查, 以及特殊情况处置等工作进行了测试。

自 2012 年 2 月 28 日, 中国石化、东方航空、中国航油和空客公司密切合作, 顺利完成了适航审定“规定动作”, 并进行了发动机台架验证和试飞验证。专家组历时两年最终得出结论, 中国石化 1 号生物航煤生产质量稳定, 性能能满足实际使用要求, 通过了适航审定程序和指标要求, 完全具备商业化应用条件, 可以颁发适航许可证书。2014 年 2 月 12 日, 中国民用航空局在北京正式向中国石化颁发 1 号生物航煤技术标准规定项目批准书 (CTSOA), 中国第一张生物航煤生产许可证落户中国石化。这标志着备受国内外关注的国产 1 号生物航煤正式获得适航批准。2015 年 3 月 21 日, 加注中国石化 1 号生物航空煤油的海南航空 HU7604 航班波音 737-800 型客机 (见图 10-3 和图 10-4), 搭载 156 名乘客和 8 名机组人员于 8 点 20 分从上海虹桥机场起飞, 经过两个半小时的飞行后, 于 10 点 50 分平稳降落在北京国际机场, 标志着中国自主研发的 1 号生物航煤首次商业飞行取得圆满成功。



图 10-3 海航 737 在上海虹桥机场加注航空生物燃料



图 10-4 生物航油



### 10.1.3 生物航空燃料与减排

随着航空业的迅猛发展，全球航空每年消耗航空煤油约 15 亿到 17 亿桶，其 CO<sub>2</sub> 排放量约占航空业总排放量的 90%。虽然航空业温室气体排放量仅占温室气体排放总量的 2% ~ 3%，但因其排放位置问题，航空煤油燃烧后造成温室效应的危害远远大于其他行业，航空业正面临严峻的温室气体减排挑战，航空业减排已经成为全球应对气候变化的焦点问题之一。

开发航空生物燃料被公认为是完成航空业减排的根本途径。

#### 1. 环保法规日趋严格，促进航空生物燃料的发展

航空飞行中燃料燃烧产生的温室气体主要排放在平流层，排放危害远远大于其他行业，航空业减排已成为全球应对气候变化的焦点之一。“绿色、环保”将成为未来民航业发展的主题，在欧美等国也逐渐成为业界的共识。随着引擎技术的不断提高，飞机燃油消耗量与 40 年前相比降低了 70%，与 10 年前相比降低了 20%。开发研究新技术是航空运输业实现“绿色、环保”的关键所在，空中客车公司总裁兼首席执行官加卢瓦表示，“从 2020 年起，所有新设计的空中客车飞机与 2000 年设计的相比，二氧化碳排放量将减少 50%，氮氧化物排放将减少 80%，噪音将降低一半。”即便如此，也无法从根本上实现碳减排。使用航空生物燃料将是实现温室气体减排的根本途径，航空生物燃料的组成与石油基航空喷气燃料相似，性能相当，可满足航空器动力性能和安全要求，不需更换发动机和燃油系统，温室气体排放量明显低于石化航空喷气燃料，温室气体可减排 50% 以上。

#### 2. 欧盟“绿色天空”计划

2006 年欧盟委员会提议将航空运输业纳入到碳排放体系（ETS），2008 年欧洲议会通过了关于将航空运输业纳入 ETS 的草案，并于年底正式生效。2009 年，欧盟公布了受该草案约束的全球 2000 多家航空公司名单，上述航空公司在欧盟飞行均要遵守欧盟的“绿色天空”计划，从 2012 年开始承担减排责任（即将航空业纳入 EU-ETS）。所谓“绿色天空”计划就是规定进出欧盟区域机场的航空运输公司将被分配一定的碳排放限额，航空公司碳排放总量小于限额的剩余部分可出售，而超出限额部分则需购买。根据欧盟航空碳排放交易指令，各航空公司的排放基准线为 2004—2006 年在飞往和飞离欧盟地区的航班碳排放量年平均值。2012 年，各航空公司的累计排放量将不得超过 3 年平均值的 97%；到 2013 年，不得超过 3 年平均值的 95%。在起步阶段，各航空公司将获得一定比例的免费“配额”，即相应的排放额度。以 2012 年为例，航空公司 85% 的排放配额都可以免费获得，此后，航空公司可免费获得的排放额度将会逐年下降。到 2013 年，这个比例将下降到 82%。另外 3% 将留给那些新进入航空业的公司。此后，在允许的排放总量逐年递

减的同时, 免费配额的比例也将逐年减少, 直到 2020 年取消免费配额而全部采取拍卖方式发放。对于未能完全豁免的航空经营者, 可向各管理成员国的有关当局申请免费排放额, 对拒不执行的航企将施以超出规定部分每吨 100 欧元的罚款以及欧盟境内禁飞的制裁。

针对航空碳排放问题, 国际航协提出一些举措如开发新技术, 提高飞机发动机的燃油燃烧效率。国际航协认为, 使用燃烧效率更高的飞机每年约可减少二氧化碳排放 1.3%, 是其中最为重要的减排措施。但即使如此减排, 仍不足以完成碳减排目标, 更无法完成国际航协的承诺。使得越来越多的业内人士把希望寄托于生物燃料上。波音公司认为, 航空生物燃料在生命周期内可减少 60% ~ 80% 的二氧化碳排放, 发展生物燃料是航空运输业高速发展下减少二氧化碳排放的关键所在。许多国家开始大力推进生物航空燃料产业的发展, 并采取各种措施加快生物航空燃料的研发进程, 以应对愈加严苛的减排挑战。国际航运协会预测, 航空工业二氧化碳排放需要达到 2005 年水平或更低。为实现减排目标, 国际航运协会 (IATA) 提出到 2017 年, 喷气燃料中生物燃料的比例至少要达到 10%<sup>[5]</sup>。

### 3. 我国航空业环保压力与能源安全压力

根据我国“十二五”规划, 到 2015 年, 单位 GDP 二氧化碳排放降低 17%, 单位 GDP 能耗下降 16%, 非石化能源占一次能源消费比重提高 3.1 个百分点, 主要污染物排放总量减少 8% ~ 10%。到 2020 年单位 GDP 二氧化碳排放将比 2005 年下降 40% ~ 45%, 交通运输是减排的重点行业, 航空业也必须做好减排工作。

欧盟公布的全球纳入欧盟碳排放交易体系的航空公司名单中我国航空公司超过 30 家, 欧盟这项法案对我国航空业影响很大。我国作为世界第二航空大国和全球最大的航空消费市场, 2015 年航空燃料消费量已达到 2000 万吨, 依据欧盟碳排放交易体系, 我国每年须向欧盟支付数亿元人民币。根据中国民航局的计算, 我国 2020 年需要支付超过 30 亿元人民币, 我国航空业即将面临严峻的减排与成本挑战。我国航空业温室气体减排压力巨大, 航空生物燃料在我国航空业具有广阔的应用前景。

近年我国航空燃料产量平稳增长, 2000—2008 年平均增幅约 7.2%, 民航用煤油约有 40% 需要依靠进口, 2009 年我国进口 610 万吨航空喷气燃料。2011 年国内航空喷气燃料消费量为 1700 万吨, 2020 年航空喷气燃料需求量约 4000 万吨。虽然我国航空喷气燃料产量也将持续增加, 但很长时间内仍然存在缺口, 航空生物燃料的生产可填补市场对航空燃料的需要。

发展航空生物燃料是“绿色航空”的必由之路, 也将是实现航空运输业可持续发展目标的必由之路。我国航空公司的机型较新且机龄较短, 我国航空业燃烧效率已高于美国、日本等发达国家, 因而通过改善机型等途径减排的剩余空间很小<sup>[2]</sup>。目前我国多数航空公

司通过优化航路、让飞机直线飞行以减少飞行距离来减少碳排放。但由于空域和航路的限制，还是难以选择最佳航线、最佳飞行高度和飞行速度，所以通过提高运行效率来减排的难度也很大。这表明这些都不是根本解决办法，航空生物燃料产业定能成为我国航空业实现减排的突破口，是应对欧盟碳排放贸易的有效手段。发展生物航煤对于保障我国能源安全、取得绿色低碳竞争优势具有重要战略意义。

### 10.1.4 生物航空燃料标准

2009年9月，ASTM批准了首个替代航空喷气燃料的规范ASTMD 7566，允许使用费托工艺合成碳氢化合物燃料。2011年6月，ASTM还批准了氢化可再生航空燃料（HRJ）与石油航空燃料各占50%的航空生物燃料。

我国使用的航空生物燃料除了满足美国材料与试验协会于2011年7月发布的ASTM7566-11《含合成烃类的航空涡轮燃料标准》，同时还需满足中国民用航空局针对航空生物燃料制定的技术规范CTSO-2C701《含合成烃的民用航空喷气燃料》。航煤又称喷气燃料，馏程范围一般在130℃～280℃之间。要求密度高，冰点低。

喷气燃料的基本组成为不同的石油烃类和残留的少量非烃及添加剂。

目前我国生产的喷气燃料分为5个牌号：1号喷气燃料（RP-1）与2号喷气燃料（RP-2）为煤油型燃料，馏程为135℃～240℃，结晶点分别为60℃和50℃，两者均用于军用飞机和民航飞机。3号喷气燃料（RP-3）为较重煤油型燃料，馏程为140℃～240℃，结晶点不高于46℃，闪点大于38℃，用于民航飞机。4号喷气燃料（RP-4）为宽馏分型燃料，馏程60℃～280℃，结晶点不高于40℃，一般用于军用飞机。5号喷气燃料（RP-5）为重煤油型燃料，馏程为150℃～280℃，结晶点不高于46℃，闪点大于60℃，适用于舰艇上的飞机使用。进出口油品中以3号喷气燃料为常见<sup>[6]</sup>。

目前，化石航空喷气燃料仍占据航空燃料主导地位，这就要求替代燃料的性质必须与现有的传统燃料性质相近，可与其完全互溶、可以任何比例进行混合和共同运输。航空生物燃料不含有芳烃成分，具有优异的热安定性、燃烧性和良好的材料相容性，除产品密度偏低外，其他性能指标均与化石航空喷气燃料一致。

ASTMD7566标准被航空油料界认为是划时代的标准，极大地推动了航空替代燃料的发展。ASTMD7566标准明确了通过生物质气化-费托合成-加氢处理所合成石蜡煤油（FT-SPK）、动植物油脂经加氢处理改质的石蜡煤油（HEFA-SPK）两种生物航煤可作为喷气燃料调合组分。ASTMD7566规定制备的生物航煤还需与石油基航空喷气燃料按一定比例调合后才能在飞机上使用，调合后质量也必须与现行的航空喷气燃料标准规格完全一致。当前，我国尚未颁布生物航煤标准，在我国首次航空生物燃料试飞中，中国石油供应的生物燃料参照ASTMD7566标准中相关要求生产，并与石油基3#喷气燃料进行掺调，调合出符合GB6537-2006标准及适航审定要求的航空生物燃料试飞用

油，该航空生物燃料在试飞过程中能完全满足发动机重新启动、飞行高度、加速性能等各项指标。

## 10.2 生物航空煤油的生产

### 10.2.1 生物航空煤油的生产原料

生物航煤是生物液体燃料的一种，2008 年起欧美发达国家陆续开展了生物航空燃料的研发和试飞，航空生物燃料的生产原料主要为椰子油、棕榈油、麻风子油、亚麻油、海藻油、餐饮废油、动物脂肪等。2012 年 10 月，以餐饮废油为原料生产生物航煤产品。餐饮废油生产生物航煤的工艺技术，一定程度上解决了餐饮废油科学合法、高效利用的难题，十分有利于餐饮废油资源的绿色再利用<sup>[7]</sup>。

### 10.2.2 生物航空煤油的制备工艺

国内外已开发出多种航空生物燃料生产工艺线，其研究思路主要是将生物质转化为中间产物（生物质油或合成气），再对中间产物（或天然油脂）进行改性制备生物航空燃料，主要工艺路线包括：天然油脂（或生物质油）加氢脱氧 - 加氢裂化 / 异构技术路线（加氢法）；生物质液化（气 - 费托合成） - 加氢提质技术路线；生物质热裂解（TDP）和催化裂解（CDP）技术路线。其中，加氢法和气化 - 费托合成法生产生物航空燃料的技术发展迅速<sup>[7]</sup>。

根据原料的不同，航空生物燃料的生产工艺主要包括费托合成和加氢脱氧。通过费托合成工艺合成的烃类航空涡轮燃料被航空油料界认为完全符合美国材料测试协会 ASTM D 7566 标准要求，能够将其以最大体积比 50 : 50 与传统喷气燃料调和，调和后燃料无需任何加工可以直接加注于飞机。

#### 1. 加氢法

加氢脱氧工艺生产航空生物燃料是将动植物油脂或微藻油通过深度加氢生成加氢脱氧油。为使生产的加氢脱氧油达到直接与石油基燃料掺混的要求，加氢脱氧油需进一步通过加氢异构反应增加分子支链。该工艺由两步反应组成：（1）首先利用氢气与油脂反应，生成丙烷与石蜡烃，同时去除石蜡中的氧原子，并使所有烯烃转化成石蜡烃，原料油中的氧原子的脱去提高了燃料的燃烧热，而烯烃的饱和提高了燃料的热稳定性和氧化安定性；（2）通过加氢异构化反应使石蜡烃异构化，降低石蜡烃的凝点，转化为符合喷气燃料范围的石蜡烃。该工艺的生产原理见图 10-5，合成过程见图 10-6。

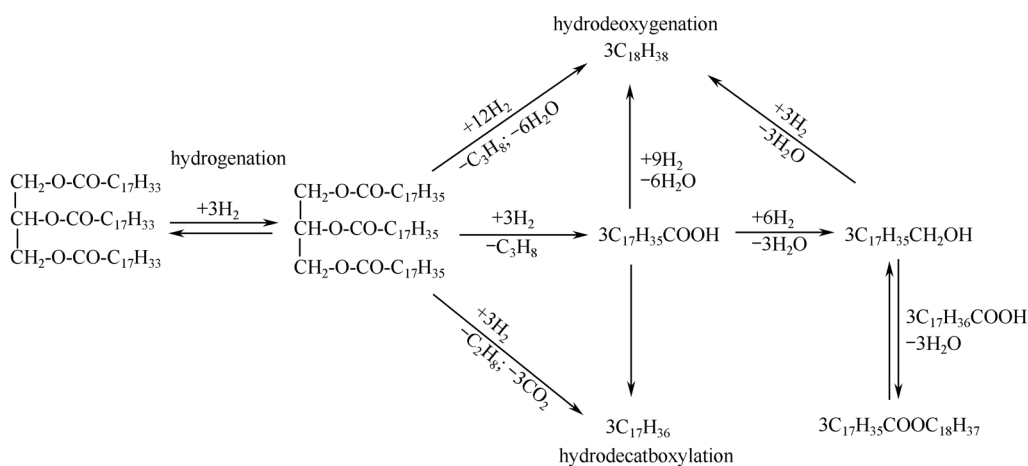


图 10-5 甘油三酯发生的加氢脱氧反应

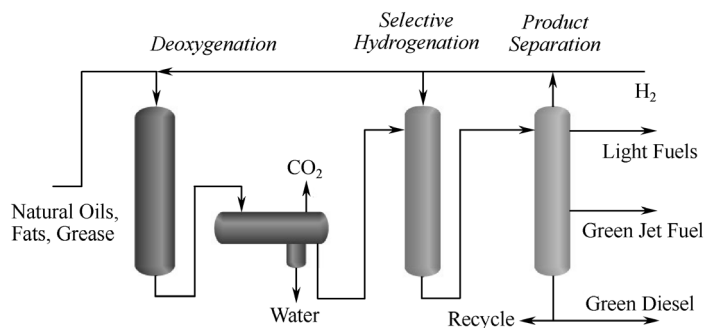


图 10-6 UOP 公司加氢脱氧工艺流程图

## 2. 气化 - 费托合成法

合成气在催化剂作用下转化为液态烃的方法是由德国科学家 Frans Fischer 和 Hans Tropsch 于 1923 首先发明的，故称为费托合成。利用费托合成技术，不但可以从煤炭中提炼汽油、柴油、煤油、航空润滑油等石油制品，而且还可以利用生物质制备航空燃油、润滑油等多种高附加值的产品。

利用费托合成法合成生物航空煤油是一种利用生物质间接合成液体燃料的方法。在高温、高压下通过热化学途径将生物质转化为合成气（主要成分为一氧化碳与氢气），然后在催化剂的作用下，合成气生成各种烃类和含氧有机化合物，所得产品通过进一步加氢脱氧处理即可制成液体的航空生物燃料。即首先通过热化学途径将生物质转化合成气，然后通过催化剂作用使合成气转变为液态的烃类，即获得了生物航空煤油。费托合成技术也是“煤变油”过程的核心技术，煤转化为合成气后，合成气转化为液态烃，即实现由固态煤向液体燃料的转变。

费托合成合成的主反应：



生成烷烃:  $n\text{CO} + (2n+1)\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{(2n+2)} + n\text{H}_2\text{O}$

生成烯烃:  $n\text{CO} + (2n)\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n} + n\text{H}_2\text{O}$

水煤气变换反应:  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

费托合成的副反应, 如:

生成甲烷:  $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$

生成甲醇:  $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$

生成乙醇:  $2\text{CO} + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$

积炭反应:  $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$

费托合成催化剂主要由 Co、Ni、Ru、Fe 等 VIII 族金属制成, 催化剂载体则由氧化铝、二氧化硅、高岭土或硅藻土等金属氧化物或盐类组成。燃料费托合成工艺催化剂中的活性组分以 Fe、Co、Ni、Ru 和 Rh 最为活跃, 这是因为金属在元素周期表中的位置决定了其加氢能力及其产物特征。合成催化剂在使用前需要通过  $\text{CO} + \text{H}_2$  或  $\text{H}_2$  还原活化。目前, 使用较成熟的间接液化催化剂主要有铁系和钴系两大类。目前, 费托合成多采用 Co 基和 Fe 基催化剂。Co 基催化剂具有较高的链增长能力, 反应过程稳定, 不易积碳和中毒, 产物中含氧化合物少, 适用于制备航空生物燃料。

铁基催化剂又可分为熔铁及沉淀铁。熔铁主要用于高温费托合成, 它具有比表面积低, 孔径小, 低活性等特点, 适宜反应温度为  $320^\circ\text{C} \sim 340^\circ\text{C}$ , 压力为  $2.0 \sim 2.2\text{MPa}$ , 合成产品多以低碳烃为主。沉淀铁催化剂具有高比表面积、大孔径及高活性的特点, 适用于低温费托合成, 反应温度为  $220^\circ\text{C} \sim 270^\circ\text{C}$ , 压力为  $3.0 \sim 5.0\text{MPa}$ , 对碳链长为 5 以上的烃类选择性高, 合成产品多以柴油和石蜡为主<sup>[8]</sup>。同铁基催化剂相比, 钴基催化剂具有活性高、重质烃选择性高, 在反应过程中稳定、不易积碳和中毒等优点, 因而被广泛应用在费托合成工艺中制备航空生物燃料。研究表明, 钴基催化剂的活性相是金属相, 表面碳化钴物相的形成常伴随着催化剂失活的发生, 催化剂的单位活性与其分散度无关。催化剂的使用是费托反应的关键技术之一, 因而寻找活性高、选择性高、稳定性好、价格低廉且具有工业应用前景的催化剂对费托合成航空生物燃料技术的工业化应用具有重要意义<sup>[8]</sup>。

总体而言, 国际上生物航空燃油几乎全由油脂原料制取, 然而由于油脂的成本高昂, 除各大航空公司进行试飞或局部航线示范飞行外, 生物航空煤油尚未进行规模化应用。2014 年 12 月 22 日科技日报报道, 由中国科学院广州能源研究所承担的国家 863 计划“生物质水相催化合成生物航空燃油”课题取得了重要进展。课题组人员以秸秆等木质纤维素类生物质及木薯等非粮生物质为原料, 研发出了生物质高效水热解聚—水相化学催化合成生物航空燃油新技术, 并设计建成了国际上首座生物质水相催化合成生物航空燃油中试装置, 生产的生物航空燃油经国家油品质量监督检验中心检测, 达到了国际生物航空燃油 ASTM7566 标准, 具备了应用于航空飞行的质量可行性。研发团队突破核心技术, 研制了高水热稳定的水相化学催化材料及水相合成反应器, 形成了拥有自主知

识产权的生物质水相化学催化合成生物航空燃油成套技术及装置，成果已获得多项国内外发明专利授权。中试结果表明，8 ~ 10 吨秸秆类生物质原料可生产 1 吨生物航空燃油产品，生产成本约为 8000 ~ 10000 元 / 吨，通过进一步优化及提高催化效率，生产成本可再降低（目前航空燃油价格在 7000 ~ 8000 元 / 吨）。我国在这一技术领域率先取得突破，有望成为率先掌握纤维素生物航空燃油生产技术的国家。

## 10.3 生物航空燃料面临的挑战

在相当长的一段时期，很多新能源如电能、太阳能、氢能、核能等无法作为燃料用于商业飞行。目前，航空业能选择的可替代能源只有生物燃料。我国航空生物燃料发展正处于起步阶段，航空公司还没有大规模使用生物航空燃料。虽然航空生物燃料开发应用已经取得一些进展，但我们仍面临一些亟待解决的重要问题。

### 1. 原料来源不稳定

如何扩大航空生物燃料原料来源，确保原料可持续供给是发展生物航空燃料产业的最根本问题。我国航空生物燃料主要是以木本油料作物和地沟油为原料，木本油料受季节和地域的影响较大，而在种植方面为避免占用粮食耕地，也只能尽量选用荒地坡地等边际土地，寻找木本原料合适的种植地区是开发木本油料考虑的首要问题。据估算，全国每年可形成“地沟油”500 ~ 600 万吨，而 1 吨地沟油大约能够产出 0.5 吨生物航煤，远远不能满足市场需求。

目前，航空生物燃料原料种类以小桐子，亚麻芥、盐土植物以及微藻为主。这些原料具有不与民争粮，不与粮争地的优势。其中，小桐子作为木本油料作物中含油率最高的一种植物。耐干旱、耐贫瘠、不占用耕地、耕作栽培成本低，果实的含油率 35% ~ 41%，每 3 吨小桐子可提炼出约 1 吨小桐子毛油，经过进一步精炼之后，可生产航空生物煤油、生物柴油等生物燃料。中国科学院广州能源所承担国家“863”项目“纤维素类生物质高效转化利用技术”、“生物质水相催化合成生物航空燃油”课题是利用纤维素类能源植物制造生物天然气和生物航空燃油，前景十分可观。

### 2. 生产工艺需改进

现在较成熟的工艺是原料油进行加氢脱氧和异构化，燃料中残存少量的脂肪酸酯类等非烃类化合物，可使航空燃料冰点升高，运输和储存稳定性变差，这些是影响航空生物燃料性能的重要因素之一。费托合成的航空生物燃料虽然在组成、物理化学性质等方面与传统石油基航空煤油相似，但是由于几乎不含硫以及芳烃，燃料润滑性能较差<sup>[7]</sup>。

就麻风树油生产生物航空燃料的技术而言，中国石化和中国石油都拥有生产润滑油基础油的两段加氢（加氢处理，加氢异构）技术。就生物质生产生物航空燃料的技术而

言, 武汉凯迪公司自主开发的生物质气化合成液体燃料技术 2008 年底通过专家组鉴定, 2009 年建设示范工厂, 可以生产柴油、汽油和化工产品。就海藻生产生物航空燃料的技术而言, 中科院青岛生物能源和过程研究所与中国石化合作开发的海藻生产生物柴油技术, 计划在 2010 年底建成的海藻养殖中试系统。2015 年建成年产 5000t 海藻的产业化示范系统<sup>[3]</sup>。

### 3. 生产成本较高

目前生物航油的价格是普通航油的 2 ~ 3 倍左右, 成本较高是制约生物航煤实现产业化的“瓶颈”。从原料到航空生物煤油, 首先会产生两种直接成本: 一方面, 原料的购买和运输等要付出成本, 另一方面, 原料的处理需要成本。除此之外, 还有外部的间接成本。一是所有的处理过程势必造成新的污染源, 包括排放二氧化碳和其他污染物; 二是进一步处理剩余物的需要。

目前生物航煤已经开始了商业化应用, 生物燃料技术虽然已具备工业化生产能力, 但目前原料成本占到整个成本的 85%, 其他炼制过程和消耗却只有 15% 成本。换句话说, 原料收集和原料成本将决定整个产品的价格。废弃油脂量有限, 且价格昂贵, 在成本上还是无法满足航空运营的需求。

与传统航空煤油相比, 生物航煤不仅原料可以再生、具有可持续性, 而且无须对发动机进行改装, 且具有环保优势。生物航煤作为石油基航空煤油的有力补充, 不仅可以有效降低碳排放, 也可作为拓展非石油资源生产航空煤油的新途径, 减轻我国对进口石油过分依赖的压力, 具有广阔的发展前景。从长远看, 寻找可大规模应用于商业开发的生物航空燃料已成为全球航空业的当务之急, 也促使包括飞机制造商、航空公司、发动机生产商在内的航空产业链上的成员们通力合作, 努力开发民用飞机可使用的航空生物燃料, 实现绿色飞行和可持续发展。

民航局预计 2020 年航空燃料消耗量将超过 4000 万吨, 生物航空燃油预计占航空燃油总量的 1/3, 可达 1200 万吨。我国每年农林废弃生物质资源量约折合 7 亿吨标准煤, 其中秸秆年产量约 6 亿吨, 林业生产和木材加工废弃物约 3 亿吨, 再加上木薯等非粮生物质, 资源丰富。综上所述, 我国作为世界航空运输业大国, 为了兑现我国政府减少二氧化碳排放的承诺, 应该采取积极有效的措施, 加速发展我国生物航空燃料产业。今后, 我国科研机构应继续与大型石油石化公司强强联合, 进一步加大航空生物燃料研发投入, 不断降低航空生物燃料生产成本, 使生物航空燃料产业蓬勃发展。

## 参考文献

- [1] 魏颖, 潘峰, 王鹏波等. 航空煤油精制工艺的产污对比及防治措施 [J]. 化工环保, 2014, 34(3): 276-280.

- [2] 胡徐腾, 齐泮仑, 付兴国等. 航空生物燃料技术发展背景与应用现状 [J]. 化工进展, 2012, 31(8): 1625-1630.
- [3] 姚国欣. 加速发展我国生物航空燃料产业的思考 [J]. 中外能源, 2011, 16(4): 18-26.
- [4] 郁艸兰. 航空运输业碳排放量计算及低碳策略研究 [D]. 大连海事大学, 2012.
- [5] 陶志平. 生物航煤发展需突破高成本瓶颈 [J]. 中国石化, 2013, (3): 44-45.
- [6] 朱莹. 多组分石油产品的挥发性研究 [D]. 南京理工大学, 2008.
- [7] 张玉玺. 生物航空煤油的发展现状 [J]. 当代化工, 2013, (9): 1316-1318.
- [8] 陈凯, 夏祖西, 孙婷等. 利用费托合成工艺制备航空生物燃料 [J]. 天然气化工, 2012, 37(4): 74-78.

第 11 章

能源微藻





微藻是一种含有叶绿素 a 并能进行光合作用的藻类，是最低等的自养水生生物。微藻作为光合自养微生物，在生理上，微藻具有太阳能利用效率高、适应环境能力强等特点。与其他油料作物比较，具有生长速度快、脂质含量高，且无需耕地种植等诸多优点。在营养组成上，微藻细胞富含蛋白质、多糖、脂类，可应用于食品、饲料、医药、精细化工及染料领域。

油脂是制备液体生物燃料的主要原料，油脂原料缺口问题一直是影响生物液体燃料发展的瓶颈问题。微藻油脂与动植物油脂成分类似，以甘油三脂和少量游离脂肪酸为主。所谓微藻生物柴油不是说藻油可直接用作燃料油，而是指通过对藻油化学改性，将其转化为生物柴油或航空燃油。通过培养微藻来生产油脂具有广阔的前景，微藻具有以下特点：（1）培养条件宽松，可以在盐碱、滩涂等不适合农作物生长的土地上培养；（2）可以利用废水、废气等各种类型的水资源和碳源培养；（3）光合效率高，微藻中光能转化率可达 10% 以上，微藻在生长过程中能够高效捕获空气中的  $\text{CO}_2$  作为其营养成分；（4）微藻产油量高，部分藻种如裂壶藻，油脂含量占细胞干重的一半以上。与传统生物柴油生产原料玉米、大豆等农作物相比，其生产效率高、占用土地面积少。此外，微藻还能将太阳能转化为氢能，是开发替代能源的理想材料。

微藻是自然界中光合效率最高、生长最为迅速的原始生物种类之一。在地球上微藻种类超过 20 万种，主要分布在湖泊、海洋、池塘、沟渠以及潮湿的土壤环境中，微藻每年固定的  $\text{CO}_2$  大约占全球净光合产量的 40%，在能量转换和碳循环中起到举足轻重的作用。不同种类微藻生长方式、代谢途径各异：如有些微藻能够通过光水解产生氢气；有些微藻在生长繁殖过程中能够积累大量的脂肪酸，如硅藻、杜氏藻和小球藻等，含有 30% ~ 50% 左右的脂类，有的甚至高达 85%；还有些微藻在次生代谢过程中能产生烃类物质，如布朗葡萄藻中烃类物质占干重的比例高达 75%，产生的烃类可以直接作为燃料混入柴油中。

## 11.1 能源微藻的发展状况

美国在微藻研发领域取得了大量开拓性成果。1976 年美国能源部开始启动微藻能源研究项目，利用废气作为微藻培养的养料。1978 年，美国能源部通过了利用微藻开发生物柴油的“水生生物种计划”，由美国可再生能源实验室牵头联合多个单位进行微藻资源调查与筛选工作。1996 年，美国国家可再生能源实验室通过基因工程手段成功构建了工程小环藻，该工程藻在实验室条件下产生的脂质含量达到 60% 以上，进行户外培养脂质产量可达 40% 以上。这些工作为微藻的深入研究奠定了坚实基础。2006 年 11 月，美国绿色能源科技公司和亚利桑那公众服务公司在亚利桑那州建立废气 - 微藻培养系统，利用烟道气中的二氧化碳作为原料，进行微藻的规模培养。2007 年，由美国能源部牵头的“微藻曼哈顿计划”启动，计划实现微藻生物柴油的工业化。2010 年 6 月 28 日，美国微藻生物燃料技术路线图出炉，对以藻类为原料进行燃料生产的研发现状、挑战及解决途

径进行了科学分析,从科学、经济、政策前景等方面对藻类生物燃料的研发投资进行评估与指导。

日本、加拿大、英国等国也相继将微藻生物柴油技术列入重大研究计划。从 1990 年到 2000 年间,日本国际贸易和工业部资助了“地球研究更新技术计划”项目。该项目利用微藻来固定  $\text{CO}_2$ ,着力开发密闭式光生物反应器技术,通过微藻吸收火力发电厂烟气中的  $\text{CO}_2$  来生产生物质能源。该项计划由企业和政府的研究机构联合攻关,筛选微藻 10000 多种,分离出多株耐受高  $\text{CO}_2$  浓度、生长速度快、适合高细胞密度生长的藻种,建立了光生物反应器的技术平台,初步建立了微藻生物质能源开发的技术方案。

2008 年 10 月,英国碳基金公司启动了目前世界上最大的藻类生物燃料项目,用于发展相关技术和基础设施,该项目预计到 2020 年实现商业化。

“十一五”末期,我国及时启动微藻制油技术,近年,我国涌现出一大批科研团队在微藻生物能源的基础研究、关键技术以及中试放大方面开展了系统性研究,代表性的科研机构包括中科院青岛能源所、北京化工大学、清华大学、中国海洋大学、上海交通大学、华东理工大学、新奥集团生物质能研究所以及中国石化等。此外,在微藻遗传育种、功能基因与代谢物组学、下游的装备技术以及生物柴油、航空生物燃料转化方面取得了长足进步,微藻能源领域达到国际先进水平。武汉植物园构建能源微藻种库,广泛收集、筛选产油、产烃藻种近百株,为筛选能源微藻提供了大量的种源。2011 年,我国微藻能源首个“973 计划”项目“微藻能源规模化制备的科学基础”正式启动,其他能源微藻项目也纷纷上马,为我国能源微藻的推进打下了坚实基础。

在微藻开发过程中,科研单位注重强强联合,以产业化为目标,从上、中、下游整条产业链上进行层层推进。上游领域,利用常规和遗传育种方法,筛选具有自主知识产权、适合产业化推广应用的优良藻种,研制新型高效光生物反应器和高密度培养技术;中游环节,优化微藻培养条件;下游工艺方面,针对藻油提取、炼制环节,建立节能和环境友好型的生产工艺技术。随着关键技术的突破,我国的微藻生物能源产业会走出一条适合中国国情的路子,在实现我国可再生能源发展战略目标中发挥重要作用。

生物液体燃料需要利用油脂原料进行生产,市场对非粮用油有庞大的需求,微藻产业的发展可以从根本上解决油料资源不足的问题。以蓝藻、绿藻、金藻和红藻为代表的微藻可通过高效的光合作用,在光能的作用下将吸收的二氧化碳转化为脂肪或淀粉。与高等油料植物相比,微藻的生长周期短,积累油脂速度快,生物量 24 小时内就能实现倍增,在对数期最快生长时能在短短 3 个半小时使生物量翻倍。部分微藻的产油量远远超过了最好的油料作物,同时利用微藻作为生物柴油原料具有不与农业争地的明显优势,而且可用海水作为天然培养基进行大量繁殖。微藻油脂含量因藻种而异,一般为 20% ~ 30%,最高可达 60% ~ 70%。油脂组成上,微藻油与普通植物油类似,主要是  $\text{C}_{16}$  和  $\text{C}_{18}$  系脂肪酸。微藻的产油效率相当高,在一年的生长期,一公顷玉米能产油 172 升,一公顷大豆能产油 446 升,一公顷油菜籽能产油 1190 升,一公顷棕榈树能产油 5950 升,而一公顷的微藻能产油 95000 升。

生物燃料的生产,必须有稳定的原料来源作为支撑。粮油产量有限,而微藻高产的优

势则可填补原料不足的问题。在微藻培养环节上,可以将微藻培养与环境治理相结合,微藻能利用废水中的氮、磷等成分合成有机质,同时,微藻对二氧化碳的固定能力强,可固定发电厂烟气中的二氧化碳,这使得我们可以利用工业废水、废气、城市污水来养殖微藻。在微藻利用上,一方面可将微藻中的油脂、烃类作为能源进行开发,另一方面还可以推进微藻中虾青素、 $\beta$ -胡萝卜素等高附加值产品的开发,通过科学统筹设计为微藻产业化奠定基础。

## 11.2 微藻生物燃料的生产

微藻在能源生产中的利用方式主要包括直接利用和间接利用两种方式。微藻在生长过程中产生氢气、烃类,它们能直接作为能源进行利用,这种利用方式为直接利用;所谓间接利用是指通过培养微藻来获得油脂、淀粉、纤维素,然后以藻油、淀粉及纤维素作为原料进行化学改性,用以生产生物柴油、燃料乙醇等。目前,微藻能源的应用主要集中在微藻产氢、产烃以及微藻液体燃料的开发等相关领域。

### 11.2.1 利用藻类直接合成生物燃料

#### 1. 微藻产氢

1939年,Gaffron和Rubin发现斜生栅藻能产生氢气,此后,陆续发现多种微藻也能产生氢气,例如绿藻、蓝藻等。1978年,美国能源部提出了利用水生物种开发替代能源的计划,1978~1982年研究的主要侧重点是微藻产氢,与化学制氢方法相比,微藻产氢具有无污染、可再生和不消耗矿物资源等优点,成为生物制氢领域最有应用前景的研究方向之一。

具有产氢能力的微生物包括发酵细菌、光合细菌和蓝绿微藻三大类<sup>[1]</sup>。在地球生物演化史上,蓝藻是最早出现的光合自养型原核生物,蓝藻中如鱼腥藻、聚球藻、颤藻、螺旋藻等都证实有产氢能力。蓝藻产氢是光合产氢,以光能为能源,以 $\text{CO}_2$ 为碳源,以水为电子供体和还原物,蓝藻将水转换为氢气。

在微藻产氢过程中,氢酶发挥着关键的作用(见图11-1),绿藻产氢包括直接光解水产氢和间接光解水产氢两种途径。(1)直接光解水产氢,这一过程涉及光吸收的两个不同系统:光系统II(PS II)和光系统I(PS I)。PS II吸收光能后光解水,释放出质子、电子和氧气,电子通过PS I传递给铁氧还蛋白(Fd),氢酶接受还原态铁氧还蛋白传递的电子并释放出氢气。(2)间接光解水产氢,间接光解水产氢可以分为两个阶段,在第一个阶段中,绿藻细胞在有氧条件下通过光合作用固定二氧化碳合成碳水化合物,第二个阶段中,在无氧条件下,这些合成的碳水化合物会通过酵解产生还原力,用于Fe氢化酶的还原和氢气的释放<sup>[2,3]</sup>。

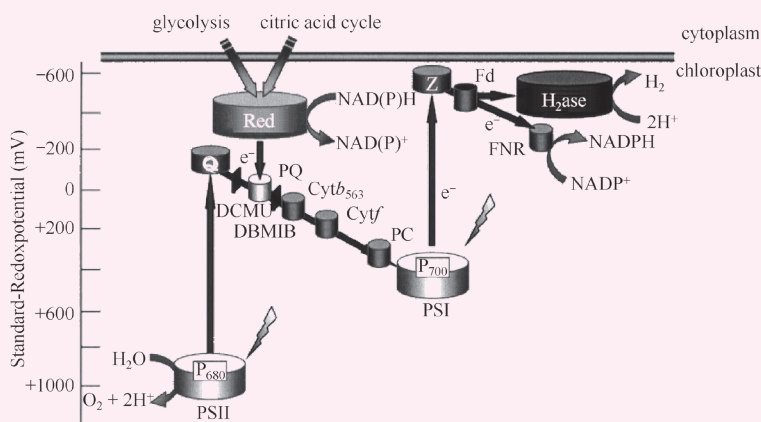


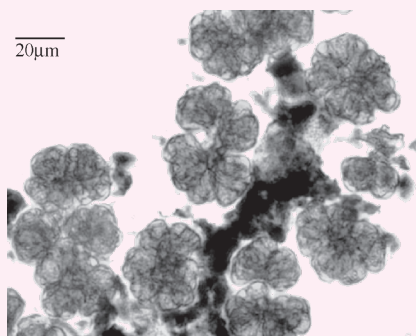
图 11-1 光依赖型电子传递及产氢模式图

随着微藻产氢机制的明晰，通过分子生物学技术对微藻进行基因改造，以获得易于高密度培养、产氢效率高的“基因工程藻”成为目前研究的热点。

## 2. 微藻产烃

烃类是汽油、柴油的主要组分，汽油主要成分为 C<sub>5</sub> ~ C<sub>12</sub> 的脂肪烃和环烃类，还含少量芳香烃；石油也是烃类混合物 (C<sub>10</sub> ~ C<sub>22</sub>)，可以利用藻类产烃来替代汽油、柴油的生产。目前发现很多藻类都具有产烃能力，不同种类微藻产烃能力、培养条件差异很大，其中具有较强产烃能力的藻类有葡萄藻、盐生杜氏藻、小球藻、高山组囊藻、灰色念珠藻。但产烃量最高、研究的最深入的藻类是葡萄藻，其烃类物质占干重的比例可以达到 75% ~ 83%。

1968 年，Maxwell 发现葡萄藻体内的油类物质属于多不饱和的碳氢化合物，葡萄藻单细胞从侧面看呈卵形（见图 11-2），多个葡萄藻集落串联在一起，在扫描电镜下呈葡萄串状；同年 Gelpi E. 等在葡萄藻和倒囊藻中检测到的烃主要是碳链长度分别为 C<sub>17</sub>、C<sub>27</sub>、C<sub>29</sub>、C<sub>31</sub> 等高度不饱和的奇数碳脂肪烃，这些发现使产烃微藻的研究进入一个崭新的阶段。葡萄藻中烃的结构（碳链长度、饱和度、有无分支等）与产烃微藻的类型、生理状态和培养条件密切相关。葡萄藻有三个品系，即 A 品系、B 品系和 L 品系。其中葡萄藻 A 品系主要合成碳原子数目在 25 ~ 31 间的奇数碳、直链烃类物质，组分以二烯烃和三烯烃为主；葡萄藻 B 品系主要合成异戊二烯烃 (C<sub>n</sub>H<sub>2n-10</sub>)，其碳链上碳原子数目在 30 ~ 37，烃类含量可达藻体干重的 30% ~ 40%；葡萄藻 L 品系，即碳原子数目为 40 的异戊二烯烃、类四萜烯烃，L 品系葡萄藻的烃类含量一般都较低<sup>[4]</sup>。

图 11-2 葡萄藻 (*Botryococcus braunii*)

影响微藻产烃的因素包括：微藻的培养方式、培养基中营养组分的配比、光照强度、温度等。研究发现氮饥饿会诱导葡萄藻中烃类物质的积累，而氨态氮的加入则会抑制葡萄



藻中烃的合成；磷含量的增加有益于碳氢化合物的合成。通过控制培养条件能够影响葡萄藻中烃的富集。

中科院过程所王军利用摇瓶培养考察了无机碳源、氮源、磷源和氟化钠等养分对葡萄藻 (*Botryococcus braunii*) 生长的影响。结果表明提高硝酸钾起始浓度能提高葡萄藻的生长速率，延长对数生长期；磷源对葡萄藻生长的影响显著，在 0 ~ 160 mg/L 范围内，增大磷酸氢二钾浓度，葡萄藻生长明显加快；适量氟化钠能促进葡萄藻的光合作用和呼吸作用，从而加快葡萄藻的生长，其最适浓度为 0.84 mg/L。藻类产烃量随培养条件、藻种不同差异很大。暨南大学水生生物研究中心胡章喜以能源微藻布朗葡萄藻 *Botryococcus braunii*764 和 *Botryococcus braunii*765 为实验材料，研究了不同氮源及浓度对其生长、总脂和总烃含量的影响。结果表明，*B.braunii*764 和 *B.braunii*765 的最适氮源均为硝态氮，且均能够利用硝态氮、亚硝态氮、铵态氮和尿素进行生长，但是不同氮源对这两株藻的生长、总脂和总烃含量的影响不同<sup>[5]</sup>。

烃类是汽油、柴油等液体燃料的主要组成部分，目前研究最多的产烃藻为葡萄藻，但葡萄藻常见品系却存在着生长速度慢，所产烃类碳链较长等问题。这就需要继续寻找潜在的高产藻类或品系，或采用遗传工程手段，改造现有的较有潜力的藻种如葡萄藻、小球藻等。随着生物信息学、分子生物学、代谢物组学的飞速发展，可以利用分子生物学技术为高产微藻菌株的构建提供技术支持。

### 3. 微藻产乙醇

微藻细胞中富含淀粉、多糖、纤维素等物质，可以参照纤维素燃料乙醇的生产技术，将其转化为燃料乙醇。小球藻、蓝藻（见图 11-3）等微藻类可以通过光合作用吸收二氧化碳，直接生产乙醇以及氧气，微藻产生的醇类可分泌到细胞外（见图 11-4），可以直接从培养基中提取，大大节省了成本和生产中消耗的能量，省去浓缩收集微藻的步骤。

2011 年 10 月 26 日，Algenol 生物燃料公司宣布投产微藻乙醇，这是微藻直接制乙醇技术第一次工业化应用，该技术使用光生物反应器培养蓝绿藻，利用二氧化碳、阳光和咸水作为养料直接生产乙醇，大大缩减了常规酒精发酵繁琐的流程。

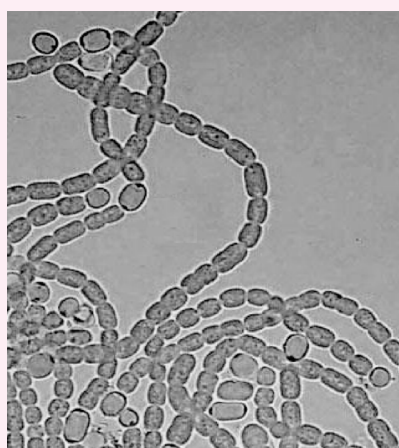


图 11-3 蓝藻

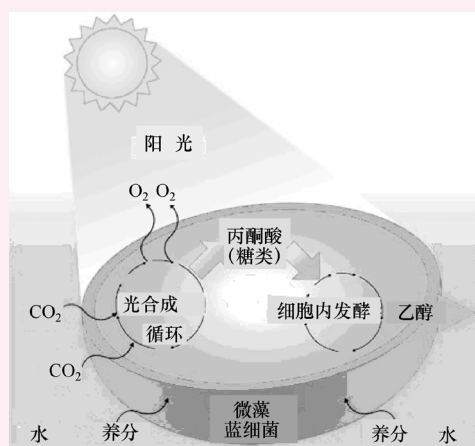


图 11-4 蓝藻（蓝细菌）生产乙醇



## 11.2.2 微藻油脂的合成

利用微藻产氢、产乙醇得到的产物是可以直接利用的燃料，氢气和乙醇通过分离、纯化后就可以直接使用，与产氢、产乙醇不同，微藻生产的脂类并不能直接作为燃料使用，还需要将油脂改性为生物柴油、航空煤油才能加以利用。

微藻细胞是一个油脂合成的工厂，微藻在单位面积上的油脂产量远远超过植物。金藻纲、隐藻纲、黄藻纲、硅藻纲、甲藻纲、绿藻纲等藻类都能合成高含量脂肪酸（见图 11-5 和图 11-6）。微藻产生油脂的过程，本质上与动植物油脂合成过程类似。在脂肪酸合成途径中，乙酰辅酶 A 羧化酶催化乙酰辅酶 A 转化为丙二酰辅酶 A（见图 11-7），乙酰辅酶 A 羧化酶催化反应不仅是脂肪合成的第一个步骤，同时也是脂肪酸合成的限速步骤（如图 11-8 所示）。因此，改造乙酰辅酶 A 羧化酶被认为是提高微藻脂质合成的关键。



图 11-5 小球藻 (*Chlorella*)

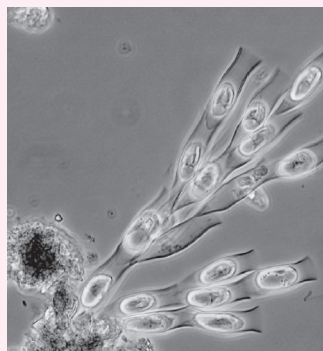


图 11-6 金藻

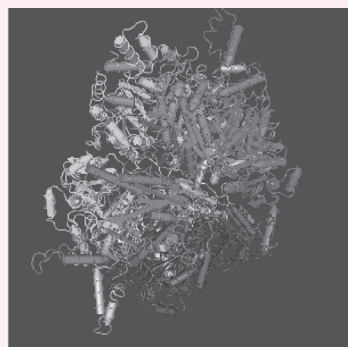


图 11-7 乙酰辅酶 A 羧化酶结构图

通过选择合适的分子载体，使编码乙酰辅酶 A 羧化酶的 ACC 基因在细菌、酵母中充分表达，然后将修饰的 ACC 基因引入微藻中以获得高效表达，目前利用分子生物学技术是提高微藻产脂的重要途径之一<sup>[6-8]</sup>。

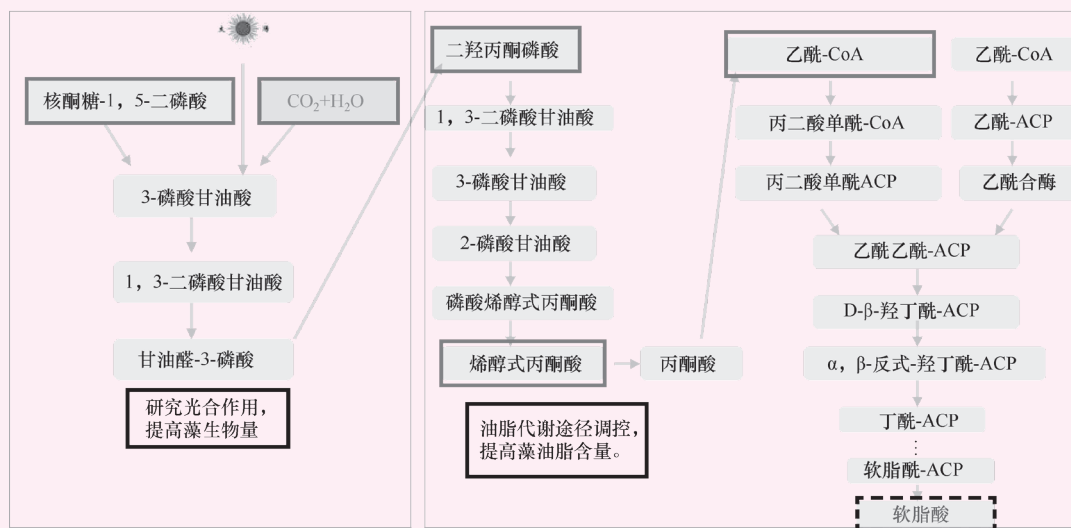


图 11-8 脂肪酸合成途径

微藻生长包括延滞期、对数生长期、稳定期和衰亡期。微藻细胞在初级代谢和次级代谢时都会进行脂类的合成，藻油的积累过程可分为两个阶段：（1）在微藻培养的前期，微藻消耗培养基中的各种营养元素，开始大量增殖，营养成分主要用于满足其自身生长、代谢，同时也进行油脂的合成，合成的脂类主要用于细胞骨架的组成；（2）在微藻培养后期，尤其是营养元素氮、磷消耗殆尽时，微藻不再进行生长和繁殖，吸收的碳源在细胞质中经糖酵解、三羧酸循环、脂肪酸合成等途径转化为甘油三酯，储存在细胞体内。大量研究表明，在某些不利的生长环境中，如在微量元素的缺乏、高盐胁迫时，会促进微藻细胞中油脂合成增加，同时还会影响藻油成分的变化。微藻培养过程中，可以通过改变环境因子和营养元素来调控藻油的积累以及藻油的构成。

### 11.2.2.1 微藻的培养方式

微藻的大规模培养方式主要有三种：自养培养、异养培养和混养培养。

#### 1. 自养培养

自养培养是直接利用太阳光及无机养料在开放式池塘或密闭式光生物反应器中培养微藻的方式。微藻自养培养已实现了产业化，主要使用的菌株包括螺旋藻、小球藻、盐藻、雨生红球藻等。

自养培养中微藻利用光源作为能量来源，以无机碳作为碳源将  $\text{CO}_2$  进行还原同化，合成细胞内所有的有机代谢物。自养培养微藻操作简单、易于大规模培养，适宜几乎所有微藻的培养，而且培养成本低，但培养密度也较低。光自养培养主要存在以下缺点：藻的生物量偏低，由于藻细胞密度较低不利于藻体的收集；光自养培养受到天气的限制，光照不足或光分布不均会导致微藻光合效率较低。

#### 2. 异养培养

异养培养是指微藻仅以人为提供的碳源、氮源作为微藻生长的营养物质，使其在没有光照的条件下进行的需氧发酵生长的培养方式，Lewin 等于 1953 年最早发现了藻类能利用有机物进行异养生长。由于异养培养不受光照、天气的影响，异养培养微藻具有生长速度快，细胞浓度高，产量大的特点。但异养培养中培养基的供给、能耗问题大大增加了微藻的培养成本。

#### 3. 混养培养

微藻混养培养又称兼养，是指微藻细胞既利用光能、无机物作为营养物质，同时也利用有机物作为微藻营养物质的培养方式。混养培养可达到较高的藻密度，但在规模培养中容易滋生杂菌。微藻的混养培养过程包括光能的吸收转化、 $\text{CO}_2$  的吸收固定，以及有机物的同化等过程，代谢途径较为复杂。

### 11.2.2.2 微藻的培养设施

微藻培养中,采用光生物反应器作为微藻培养的专门装置,生物光反应器主要包括两大类型:一类是敞开式反应器,另一类是封闭式光生物反应器。

#### 1. 敞开式反应器

目前,微藻的规模化培养一般在敞开的水平浅池中进行,池深为 10 ~ 30cm,通常采用聚乙烯或水泥做砌衬,池内采用桨板轮、螺旋桨或空气喷射器等进行搅拌。1969 年 Oswald 提出并设计的跑道池反应器(跑道池反应器因外形类似跑道而得来,见图 11-9),经过多年的实际使用,敞开式跑道池培养器已成为最常用的敞开式培养反应器。目前,微藻的大规模培养主要使用跑道池反应器,这类反应器的主要优点是投资少、建造容易、操作方便、技术要求简单。存在的缺点主要有:容易滋生杂藻、水生动物和空气中的飘浮物等,由于培养环境不稳定、培养条件无法控制,培养效率较低,只能用于螺旋藻、盐藻、小球藻等少数能耐受极端环境特定微藻的培养。



图 11-9 跑道式微藻培养池

#### 2. 密封式光生物反应器

密封式光生物反应器(见图 11-10 和图 11-11)是用透明材料组建的一种培养容器,它们除了能采集光能外,其他诸多方面与传统的微生物发酵用生物反应器类似,密封式光生物反应器的主要类型有:管道式、平板式、柱状气升式反应器。密封式光生物反应器的特点是可实现微藻的高密度培养,在微藻培养上被广泛应用。在结构上,密封式光生物反应器比开放式光生物反应器更精密,培养条件更容易控制,培养密度也较高,微藻细胞浓度每升可达几克(比敞开式跑道池中的细胞浓度高出 1 ~ 2 个数量级),这给采收带来了很大的便利。



图 11-10 管道式光反应器



图 11-11 柱状式光反应器

微藻的高密度、大规模培养是实现能源微藻产业化发展的必经之路。微藻进行规模培养面临两个紧要问题：一是生物反应器的选择。目前的反应器主要有开放式反应器、密闭式反应器或者混合反应器三种类型。不同生物反应器各有所长，由于在微藻高密度培养技术方面缺少完整、系统的研究，现在还不能确定哪一种形式更适用于规模化培养。二是如何提高微藻产量。提高微藻的产量途径有多种，一是筛选构建高产藻种，进行单一培养。这种方法的缺点是不够稳定，藻种容易被污染；另一种方法是构建一个稳定的混合藻群，或者筛选自然界中存在的混合藻群，从而使总的生物量达到最高值，但这样会对下游工艺中的油脂加工与提取过程提出更大的挑战。总体而言，微藻规模化培养还处于研究阶段，还需要开展大量工作。

### 11.2.2.3 微藻的采收

微藻培养结束后，需要通过采收工序将藻体从藻液中分离出来。微藻采收的目标是高效地从悬浮的藻液中分离大量藻体，微藻个体微小，分散悬浮于培养液中，使得微藻的采收相当困难。微藻采收是藻油提取的上游环节，然而，微藻个体微小、藻液黏稠，在板框过滤过程中容易导致滤膜堵塞；稳定的藻液悬浮体系无法自然沉降；低密度的藻液则会出现离心效率不佳，收率低的问题。

由于藻体的形态小、藻液粘稠，为了达到高效的分离效果，藻液藻体分离前需要进行预处理。藻液预处理是利用物理或化学方法改变微藻表面性质或改变悬浮液的化学环境，其中絮凝是最常用的预处理方式。经过絮凝后，采用沉淀、过滤、气浮或离心的方法即可从藻液中分离出藻体。

#### 1. 絮凝和沉降

向藻液中加入絮凝剂使藻体发生絮凝、沉降，是分离藻体的重要方法。添加凝聚剂或絮凝剂是提高沉降效率的重要手段，添加的药剂不同，絮凝和沉降的效率也不同。絮凝剂的类型、浓度、配比等与藻种密切相关，通常而言上，硫酸铝的絮凝效果较好，回收效率大于 75%，而硫酸铁和氯化铁在 60% ~ 70% 之间，相比硫酸铁，采用聚合硫酸铁可使回收率提高 21% ~ 27%<sup>[9]</sup>。絮凝剂的加入除了要保证藻体的高得率，还需考虑絮凝剂的存在对下游油脂提取的影响、絮凝剂回收问题以及排放水中絮凝剂对环境的影响，这些都需要综合考虑。藻体沉降过程中，沉降效率主要受絮凝体密度的影响，此外，藻体密度也是影响沉降效果的重要因素。

#### 2. 过滤

过滤法是常用的藻体分离法，可以作为絮凝沉降的下游工艺，也可以直接用于藻体的回收。微藻大小是影响过滤效果最主要的影响因素，个体较大的微藻不易堵塞滤膜的孔，而个体较小的微藻会严重堵塞滤膜。此外，藻液中含有藻体代谢产生的大分子、细胞残片等也会造成滤膜的污染。一般而言，对于个体较大的藻种，可采用沙滤、硅藻土过滤等方法，同时辅以加压操作以提高藻体收率；对于细胞直径小于 10 $\mu\text{m}$  的微藻，采用微滤或超



滤可以有效截留藻体，在操作过程中可使用平板膜、中空纤维陶瓷膜和 PVC 膜等。

### 3. 气浮法

所谓气浮法是指向藻液中通入空气，使藻液中形成许多高度分散的微小气泡，气泡作为载体将藻液中的藻体载浮于水面，从而实现固液分离。气浮分离前需先向藻液中加入絮凝剂，使悬浮的藻体进行絮凝，然后气浮装置底部通过气体分配头放出大量微细气泡，气泡在上浮过程中与絮凝体吸附，从而减小絮凝体的密度，使絮凝体上浮到液体表面，再由刮板刮入储槽而达到微藻采收目的。

### 4. 离心

离心分离法是应用最为广泛的微藻富集法，在离心力作用下，藻液中藻体迅速沉降，实现固液分离。离心法是一种快速的细胞采收方法，离心法的收率决定于离心力大小、藻细胞沉降特性、藻液在离心机内停留时间及沉降距离等因素。

在微藻的众多采收技术中，离心和化学絮凝是目前采用最多的方法，但离心采收过程能耗较高；化学絮凝需添加化学物质，容易造成水体污染，絮凝后产生的废水需要进行处理，成本上升。重力沉降仅适用藻体较大的藻类，如螺旋藻大规模生产，而对于藻体密度低，体型小的藻体效果不理想。气浮法适用于分离微藻密度低、藻细胞个体小的藻液。各种分离工艺各有特点，在藻体分离时需要分析藻体的特点，选取合适的分离方法，这样才能实现藻体的分离过程高效、节能。

#### 11.2.2.4 藻油的提取

微藻厚实的细胞壁会妨碍藻油的提取，因此需要将微藻细胞结构破坏，使油脂组分暴露，然后利用溶剂将藻油进行萃取分离。微藻细胞壁较厚，有三层细胞壁，主要由纤维素、多聚糖和糖蛋白组成，糖蛋白以螺旋的形式盘绕在细胞表面。由于微藻坚韧的细胞壁，要获得藻油，首先需要进行细胞破壁，将包裹藻油的组分进行破坏，然后再将藻油提取出来。藻油的提取包括微藻的破壁和萃取两步。

#### 1. 微藻的破壁

微藻的破壁方法主要有机械破壁法、热化学破壁法和生物酶破壁法。

##### (1) 机械破壁法

机械破壁法是指通过高压、强烈剪切或撞击使微藻细胞结构破碎。主要包括均质、压榨、超声波破壁、微波破壁、研磨和渗透压冲击等。

##### (2) 热化学破壁法

热化学破壁法是指利用高温、高压条件将微藻细胞壁结构进行破坏，常见热化学破壁方式包括：湿热破壁法、蒸气爆破法、挤压膨化法等。

化学破壁法的原理是利用化学酸碱物质对细胞壁中糖及蛋白质等成分进行溶解，使原



来结构紧密细胞壁变得疏松，从而使细胞壁结构解体，使藻油容易从藻体中溢出。

### (3) 生物酶破壁法

生物酶破壁法是指利用纤维素酶、果胶酶等生物酶来降解微藻细胞壁，使微藻中的油脂得以从细胞中释放。操作时一般先将溶液调至酶的最适 pH 值，然后加入酶液对细胞壁进行处理，酶的主要作用是将包裹藻油的木质纤维素降解、使细胞壁破裂，然后再经萃取分离，实现油脂与固体物料分离。

## 2. 藻油的萃取

微藻经过细胞破壁后，其油脂的提取方法与普通植物油的提取工艺类似，主要包括溶剂萃取法、亚临界水萃取法、超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法等提取工艺。

### (1) 溶剂萃取法

溶剂萃取法是指以有机溶剂为提取剂萃取微藻中的油脂组分，利用的是相似相溶原理，萃取的溶剂包括苯、环己烷、正己烷、丁烷等。为了达到较高的油脂的提取率，萃取前需要将微藻粉碎、干燥。

### (2) 亚临界水萃取法

所谓亚临界水是指将水加热到 100℃～374℃之间，同时给水施加一定的压力下，使水体保持液体状态，这种状态的水被称为亚临界水。

亚临界状态下水会导致流体微观结构（氢键、离子缔合、离子水合、簇状结构等）发生变化，因此，亚临界水与常温常压状态下的水在理化性质上有较大差别。常温常压下，水的极性较强，而亚临界状态下，随着温度的升高，水的氢键被打开而减弱，水的非极性

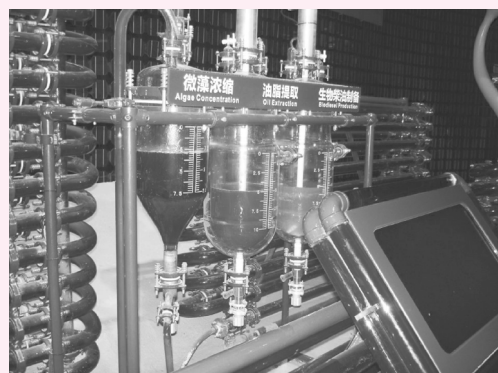


图 11-12 微藻生物油脂的提取

逐渐增强，使水具有萃取非极性组分的能力。通过控制亚临界水的温度和压力，可以大幅度调整水的极性，从而实现天然产物中有效成分从水溶性成分到脂溶性成分的连续提取。在藻油提取过程中，提高亚临界水的温度可以增加水的非极性，从而利于藻油的提取，当水温冷却至室温时，溶解在亚临界水中的油脂很容易从水中分离出来（见图 11-12）。此外，由于亚临界水萃取是以水作为萃取剂，因此，亚临界水萃取过程绿色环保、无溶剂残留。

### (3) 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法

超临界流体是介于气液之间的物态，超临界流体的密度较大，与液体相仿，而它的黏度又接近于气体，通过改变流体的压力和温度，就可以调整流体的极性。CO<sub>2</sub> 是广泛应用的超临界萃取溶剂。超临界萃取过程中，通过控制 CO<sub>2</sub> 的温度和压力，超临界液二

氧化碳将藻体中的油脂萃取出来, 可将藻油与  $\text{CO}_2$  进行分离, 从而实现藻油与藻渣分离 (其装置见图 11-13)。超临界  $\text{CO}_2$  萃取技术从整体上看是一种单元技术, 某种程度上, 它又是一种集成技术, 它集提取分离浓缩为一体, 在萃取的同时就进行萃取物的分离与浓缩, 所以具有便利、高效的特点。虽然该方法绿色、高效, 但需要保持高压和高温的操作条件, 所需的设备及能源投入较大限制了其在藻油提取中的规模化应用。



图 11-13 超临界萃取装置

#### 11.2.2.5 微藻油脂的转化利用

藻类可转化为不同类型的燃料, 如利用藻类生产氢气、甲烷等气态燃料, 也可转化为乙醇、烷烃等液体燃料, 其中最为引人注目的是利用藻油开发生物柴油和航空煤油。

藻油和植物油结构相似, 具有相对分子质量大、黏度高的特点, 藻油并不能直接作为燃料使用, 在进入发动机之前, 藻油还需要进行一系列化学改性, 最终使藻油转化为符合国家燃料标准的再生燃料。藻油转化后的液体燃料产品主要包括两大类: 一类是微藻生物柴油, 另一类是微藻航空煤油。由于微藻油与动植物油结构类似, 适用于动植物油脂转化为液体燃料的生产工艺稍加改善后都能适用于藻油。转化过程主要涉及两种转化途径为: 以酯交换的方式生产生物柴油; 以加氢催化的方式生产生物航空煤油。

##### 1. 酯交换反应制备生物柴油

藻油主要成分为甘油三酯, 通过酯交换反应可将藻油转化为生物柴油 (脂肪酸甲酯), 目前, 植物油转化为生物柴油的工艺已经非常成熟, 转化过程主要涉及酸碱催化、酶催化、固体酸碱催化以及酶催化的甲酯化反应, 藻油通过酯交换反应后即得到微藻生物柴油和副产物甘油。

##### 2. 加氢催化途径制备生物航空煤油

除了制备生物柴油, 还可以通过加氢途径将藻油转化为高品质的生物航空燃料。石化燃料特点之一是能量密度大, 即主要成分由碳、氢原子组成, 不含或者很少含有氧原子。为了提高藻油的能量密度和氧化安定性, 在藻油加工时, 应去除藻油中的氧原子, 通过加氢裂解、临氢异构等途径可将藻油转化具有支链结构的饱和烃类, 作为航空燃料使用。

#### 11.2.3 微藻其他相关产品的开发

微藻中油脂被抽提后, 剩余藻渣中还含有木质纤维素、蛋白质、多糖和色素等生物活性物质, 可被进一步开发为药物、食品及饲料添加剂等高附加值产品。通过对藻渣的高值化利用, 不仅提高了微藻能源生产过程的综合经济效益和环保效益, 降低微藻能源的生产成本 (见图 11-14)。

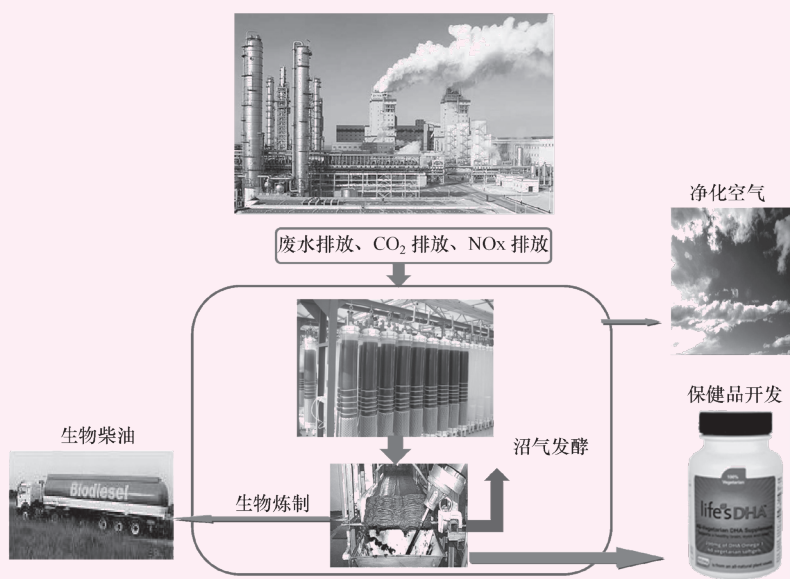


图 11-14 微藻的综合利用

### 1. 微藻蛋白

微藻的蛋白质含量高，尤其小球藻、螺旋藻备受重视。小球藻中氨基酸种类齐全，必需氨基酸总量接近鱼粉、啤酒酵母，高于一般植物性蛋白。

### 2. 微藻多糖

多糖是一种非特异性免疫促进剂，具有独特的生物学活性，能够增强人体细胞免疫和体液免疫功能。近年来，随着海洋药物的兴起，微藻多糖抗病毒、抗肿瘤、抗衰老和降血糖等活性功效逐步被揭示。2014 年 7 月，“863”计划课题“微藻多糖和活性多肽多联产关键技术与产品开发”进入中试转化测试。该项目利用天然盐碱水培养，采用高效循环采收工艺，研发高附加值的微藻功能性多糖制备技术，并开发藻渣多肽等深加工产品，发展绿色循环经济，形成微藻全组分循环利用的工艺路线。

### 3. 微藻饲料的开发

微藻可以开发为水产动物苗种的开口饵料或营养强化食物，其作用表现在：一方面，微藻是贝类、对虾幼体和部分鱼类幼体的直接开口饵料；另一方面，微藻也是培养轮虫、卤虫、桡足类和枝角类等水产养殖次级饵料生物所必需的食物。微藻中丰富而均衡的营养成分（蛋白、脂肪酸、碳水化合物）和各种生物活性物质，可满足水产养殖动物在幼苗期生长发育的营养需求。

## 11.3 微藻生物能源的挑战和展望

自 2009 年以来，我国政府及中石化等大型企业在能源微藻、微藻固碳、微藻废水资源利用等方面予以较大的投入，但在产业化过程仍存在许多问题亟待解决，表现在目前微

藻能源产品成本高、短期内尚无竞争力,以微藻能源的产业化为目的的研究开发需进一步加大支持力度。

从微藻产业上游来看,能源微藻,如小球藻、硅藻等油脂含量高,易于培养,特别是小球藻可以进行工业化生产,是理想的能源微藻资源。从下游技术来看,生物柴油的工艺已经比较成熟,微藻细胞中油脂的性质与植物油脂很相似,利用微藻油脂加工生产生物柴油,技术上完全可行。那么是什么原因限制了微藻能源的发展呢?

微藻虽具有繁殖快,产油量高的优势,但不同于农作物种植,相比之下,微藻则需要花费大量成本在培养和收集上,大幅提升了微藻能源的成本。(1)从微藻培养上,为了提高微藻的出油率,需要依据微藻的生长特点配置培养基,对培养基中的营养成分控制至关重要,而且要做到实时监控。关键营养成分的波动会对生物量产生严重影响,培养液中碳源、氮源、亚磷酸盐、铁和硅等营养成分需要严格配比,此外,在微藻生长中,其对有机物、蛋白质等营养成分的需求远远高于普通植物,从而大大提高了培养成本。(2)生产过程中藻液的机械搅拌、离心采收和干燥等环节,能耗较高。(3)微藻培养中需要大量的水,在大型微藻培养系统中,水需求量巨大,而培养后的水体中又含有较复杂的成分,如废水中富集的盐分、化学物质、生物抑制剂等会阻碍微藻的生长,难以循环利用。另外,发酵后的废水中含有盐分、残余的氮磷肥料、毒素、重金属、残留的微藻细胞等,如果将其直接回注到井中,会影响临近生态系统,但是,净化废水成本高,耗能大。

此外,微藻能源产业化过程涉及多个环节,包括上游微藻的筛选、基因改造,下游微藻的培养、油脂的分离,此外还涉及到对油脂的化学改性,微藻生产的产业链长、工序复杂,其中每一个工序都会直接影响产品的质量和成本,每一个环节都涉及多个学科领域的知识。每一环节都需要进行分解、进行技术攻关。由于微藻能源兴起的时间短,对微藻能源规模化系统的集成了解甚少,亟待开展研究。由于产业链长,而且过程复杂,这对系统集成技术人员提出了很高的要求,不仅要精通各个生产环节的技术,还能够提出系统模式和技术解决方案,从而对各个流程进行统一的进程和质量控制。

现阶段,如何降低微藻产油的成本,是微藻研究的工作重点。一方面,在藻体选育方面,通过基因工程技术从遗传背景上提高微藻油脂含量或其光合放氢的活性,研制低成本、高效节能的光生物反应器,建立有效数学模型优化培养工艺。另一方面,在微藻养殖上,可以污染物为养料,利用工厂产生二氧化碳为碳源生产能源微藻来降低生产成本,同时达到治理环境污染的目的。将微藻培养与环境治理进行联合,如以热电厂排出的  $\text{CO}_2$  作为碳源养殖微藻,在生产微藻的同时,生物固定了工业废气二氧化碳。在培养基上,需要考虑循环使用,使废水“零排放”,从而实现节能、清洁生产。

微藻浑身是宝,微藻中的油脂组分可通过酯交换或加氢催化途径转化为生物柴油、生物航空煤油;微藻中木质纤维素、淀粉类组分可以通过厌氧发酵产沼气,亦可通过热解、气化等方式转化为生物质燃气,还可以通过预处理、糖化、发酵、浓缩、脱水等工序转化为燃料乙醇;微藻中的营养组分则可以开发为高附加值的保健品、化妆品、药物等。目前,我国经济的高速发展令世人瞩目,能源是经济的血液,在我国人口众多,耕地面积严重不足的国情下,发展微藻生物能源符合“不与农争地,不与人争粮”的能源战略方针,微藻



能源的开发能造福社会，具有广阔的发展前景。

## 参考文献

- [1] 朱毅. 微藻光合放氢的生理生化调控及生物技术研究 [D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2006.
- [2] 梅洪, 张成武, 殷大聪等. 利用微藻生产可再生能源研究概况 [J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(6): 650-660.
- [3] 孟春晓, 高政权, 叶乃好等. 微藻制氢的研究进展 [J]. 海洋湖沼通报, 2008, (4): 153-160.
- [4] 葛亚明. 葡萄藻在废弃物中培养的适应性及调控研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [5] 胡章喜, 安民, 段舜山等. 不同氮源对布朗葡萄藻生长、总脂和总烃含量的影响 [J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3288-3294.
- [6] 郑洪立, 张齐, 马小琛等. 产生物柴油微藻培养研究进展 [J]. 中国生物工程杂志, 2009, 29(3): 110-116.
- [7] 梁成伟, 张晓雯, 苏忠亮等. 经济微藻重要次级代谢产物合成途径的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(26): 11192-11194, 11196.
- [8] 王琳, 余旭亚, 赵鹏等. 微藻油脂生物合成与 ACCase、PEPC 相关性的研究进展 [J]. 中国油脂, 2013, 38(2): 56-60.
- [9] 林喆, 匡亚莉, 郭进等. 微藻采收技术的进展与展望 [J]. 过程工程学报, 2009, 9(6): 1242-1248.



• 第 12 章

生物质发电



生物质能发电主要是以农业、林业和工业废弃物或城市垃圾为原料，采取直接燃烧或气化等方式发电，将生物质转化为电能。

《可再生能源“十二五”规划》中明确表示，2015 年我国生物质发电装机容量达到 1300 万千瓦，其中农林生物质发电 800 万千瓦、沼气发电 200 万千瓦、垃圾焚烧发电 300 万千瓦，分别为 2010 年装机容量的 4.0、2.5 和 6.0 倍，将带来行业的爆发式增长，按农林生物质和垃圾发电厂装机容量约为 3 万千瓦计算，相当于 5 年内要分别新建农林生物质和垃圾发电厂 200 和 83 座，总投资超过 900 亿元。

## 12.1 生物质发电的发展现状

20 世纪 70 年代石油危机爆发，新能源问题受到各国关注与思考。自 1990 年以后，欧美许多国家开始大力发展生物质发电，特别是自 2002 年约翰内斯堡可持续发展世界峰会以来，生物质发电产业在全球加快推进。

当前，欧美国家如奥地利、丹麦、法国、挪威、芬兰、瑞典和美国，尤其是北欧等发达国家，已拥有较为成熟的生物质发电技术，生物质发电量在电力总量中所占比重逐年上升。在配套政策方面，以德国、芬兰和意大利为代表的欧盟，通过总量目标制度、配额制度、高价收购制度、投资补贴制度和减免税费制度一系列政策，鼓励生物质发电。其中，德国联邦政府长期为生物质发电研发提供大量经费支持；在丹麦，生物质发电项目最高可以得到 30% 的初始投资补贴，还能享受二氧化碳税收返还的优惠，在发电设备领域，丹麦 BWE 公司是享誉世界的发电厂设备研发、制造企业之一，长期以来在热电、生物发电厂锅炉领域处于全球领先地位。丹麦 BWE 公司率先研发的秸秆生物燃烧发电技术，迄今在这一领域仍是世界最高水平的保持者。在这家欧洲著名能源研发企业的技术支撑下，1988 年丹麦诞生了世界上第一座秸秆生物燃烧发电厂<sup>[1]</sup>。目前丹麦已建立了 13 家秸秆发电厂，还有一部分烧木屑或垃圾的发电厂，BWE 公司的秸秆发电技术已走向世界<sup>[2]</sup>。

生物质发电在我国起步较晚，自 2006 年我国第一个生物质直燃发电厂——国能生物质发电有限公司在山东单县正式投产以来，到 2010 年我国生物质发电装机容量仅 5500MW，生物质发电也只占到中国可再生能源发电装机量的 0.5%。

2005 年 2 月 28 日通过的《可再生能源法》中明确指出：“国家鼓励和支持可再生能源并网发电”，该法律的颁布和实施为我国可再生能源的发展指明了方向并提供了法律保证。随后，与之配套的一系列法律、法规、政策等陆续出台，如《可再生能源发电有关管理规定》、《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》、《可再生能源电价附加收入调配暂行办法》、《关于 2006 年度可再生能源电价补贴和配额交易方案的通知》、《关于 2007 年 1-9 月可再生能源电价附加补贴和配额交易方案的通知》等，与此同时，国务院 2007 年 9 月发布了《可再生能源中长期发展规划》。至此，我国生物质发电政策框架和目标体系基本形成。这些政策的陆续出台和实施，为生物质发电技术在中国的推广利用提供了强

有力的保障<sup>[3]</sup>。

在 20 世纪 60 年代,我国开发了 60kW 的谷壳气化发电系统,目前 160kW 和 200kW 的生物质气化发电设备在我国已得到小规模应用,显示出一定的经济效益。为开发适合中国国情的中型生物质气化发电技术,“九五”期间进行了“1MW 生物质气化发电系统”的攻关。1998 年 10 月,1MW 的生物质气化发电系统建成,2000 年 7 月通过科学院鉴定并投入小批量使用,该系统在多方面比 200kW 气化发电有了改善,由于简单的气化-气轮机发电循环系统效率通常达不到 18%,该系统的效率受到了一定限制。

“十五”期间,国家 863 计划在“1MW 生物质气化发电系统”的基础上,研制开发出 4~6MW 的生物质气化燃气-蒸气联合循环发电系统,建成了相应的示范工程,燃气发电机组单机功率达 500kW,系统效率提高到 28%,为生物质气化发电技术的产业化奠定了坚实的基础<sup>[4]</sup>。

2006~2013 年,我国生物质及垃圾发电装机容量逐年增加,由 2006 年的 4.8GW 增加至 2012 年的 9.8GW,年均复合增长率达 9.33%,我国生物质及垃圾发电行业进入发展快车道。

## 12.2 生物质发电技术

在众多的生物质能利用技术中,生物质发电是最具发展潜力的利用技术之一,生物质发电技术主要包括生物质直燃发电、与煤混合燃烧发电以及气化发电三种类型。

### 12.2.1 生物质直燃发电

生物质直燃发电技术是将生物质直接放入锅炉中燃烧,产生的高温、高压蒸气推动燃气轮机做功,最后带动发电机产生清洁高效的电能。用于直燃发电的原料主要有作物秸秆(玉米、大豆、棉花、油菜等)、木块、薪柴等。直燃发电生产系统包括生物质预处理系统、锅炉燃烧系统、汽水系统以及电气系统。与一般火力发电生产系统相比,除燃料和燃烧系统略有不同外,其余汽水系统及电气系统与一般火力发电厂大体相同。根据国外实践经验,生物质直燃发电技术是利用方式最直接,也是容易规模化和工业化的一种可行的、环保的农林生物质资源综合利用技术。

与燃煤发电相比,生物质直燃发电只需要对原料简单处理就可直接燃烧发电,且其燃烧产生的灰分还可以当作肥料使用。对于秸秆直燃发电来说,秸秆燃点低,硫含量低,约为煤的十分之一。但是,生物质在燃烧过程中,也会排放各种颗粒以及高含量的碱金属如钾、钠等,此外,生物质燃烧过程中,烟气会带走大量气化潜热,能耗大,燃烧效率低。

生物质直燃发电技术中主要采用固定床燃烧或流化床燃烧方式对生物质进行燃烧。固定床燃烧对生物质原料的预处理要求较低,生物质经过简单处理甚至无需处理就可投入炉

排炉内燃烧。流化床燃烧时，要求先将大块的生物质原料预先粉碎至易于流化的粒度，故其燃烧效率和强度都比固定床高。另外，由于我国的生物质种类多，成份复杂，收集运输困难，而且这些农业废弃物会受到农业生产和季节性的影响，不能保证全年供应，所以与燃煤锅炉不同，生物质锅炉要求能适应多种生物质原料<sup>[5]</sup>。生物质直接燃烧发电技术比较成熟，在大规模生产条件下具有较高的效率。该技术在我国应用较少，因为它要求生物质资源集中，数量巨大，如果大规模收集或运输生物质，将提高原料成本，因此该技术比较适于现代化大农场或大型加工厂的废物处理。

生物质直燃发电技术与常规火力发电技术的区别主要有两点，同时也是两大技术难点，一是燃烧设备，二是上料系统。目前，工厂生物质直接燃烧发电的锅炉以炉排炉、循环流化床锅炉为主。

### 1. 炉排炉

目前，生物质发电有限公司基本采用从丹麦 BWE 公司引进的燃烧生物质振动炉排锅炉，该技术在海外被广泛应用。一般生物质燃烧后灰分很少又很轻，在层燃炉中燃烧后形成的灰不能覆盖在炉排上。因而不能有效保护炉排免受炉内高温辐射。此外，如秸秆灰中钾含量高，导致灰熔点仅  $950^{\circ}\text{C} \sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，生物质在炉排上燃烧后灰易软化，容易在炉排上结成大块，既影响锅炉稳定运行，又影响燃烧效率<sup>[6]</sup>。因此，一般不宜采用链条炉排锅炉燃烧生物质。为此，丹麦 BWE 公司开发了水冷振动炉排（见图 12-1），很好地解决了这一难题，国内 BWE 公司 130 t/h 水冷振动炉排的运行结果表明，水冷振动炉排较好地解决了炉排冷却、床面结块问题。振动炉排作为炉膛底部，存放、振动和输送生物质燃料、焦炭和灰渣。通过炉排下三个独立的风室将一次风送到三个区，即加热 / 干燥、燃烧和燃尽区。在灰渣进入捞渣机前，冷却灰渣。同时，作为蒸发受热面的一部分，通过水（冷却水温  $250^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ ）来冷却炉排，水从炉排低端流入，从炉排高端流出。

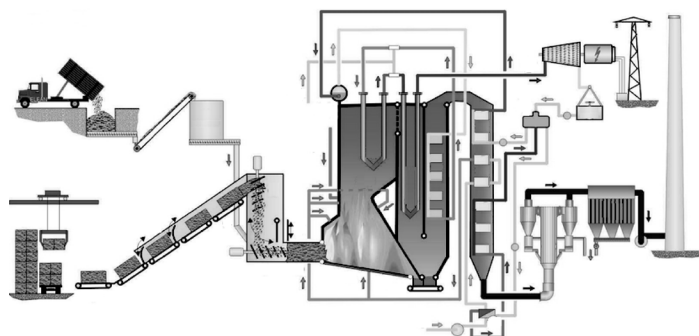


图 12-1 直接燃烧发电——丹麦 BWE 公司水冷振动炉排技术示意图

### 2. 循环流化床锅炉

目前，我国生物质发电行业所采用的循环流化床以国产为主（见图 12-2），循环流化

床炉膛内有大量惰性床料，床料和燃料的混合能够使燃烧产生的热量均匀释放；循环流化床炉膛内温度要低于炉排炉，更适合燃烧高碱生物质，同时也能够有效减少受热面沉积、缓解高温受热面腐蚀，降低结渣和聚团形成速度。在生物质燃烧过程中，流化床中强烈的颗粒运动，在防止炉膛内水冷壁上出现熔渣等方面具有积极作用；此外，较低的燃烧温度也可以保证燃料中水溶性钾转入固相飞灰中，并且维持原有水溶性状态，这对飞灰的肥用价值具有重要意义<sup>[7]</sup>。

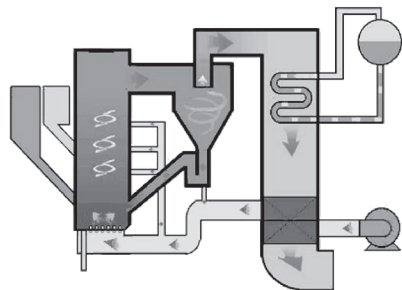


图 12-2 循环流化床锅炉

与炉排炉相比，较好的燃料适应性是循环流化床锅炉的一个特点。对低质量的燃料，比如高碱、高灰分、高含水量、较差的预处理的燃料，循环流化床锅炉都能够很好的适应。炉排炉在燃料适应性方面较差，燃料品种和性质的改变就可能造成锅炉效率的下降，更适合燃烧单一稳定的燃料。

### 12.2.2 生物质混合燃烧发电

生物质混合燃烧发电是指将生物质原料和煤一起作为燃料发电，即将生物质与煤混合后燃烧，或生物质气化后燃气在燃煤锅炉里与煤一起燃烧，产生高温蒸气推动汽轮机，从而带动发电机组发电。生物质与煤有两种混合燃烧方式：（1）直接将生物质与煤混合燃烧。该过程中，生物质要进行预处理，将生物质预先与煤混合。将混合后的生物质原料和煤直接放入燃煤锅炉燃烧，产生的蒸气带动蒸气轮机发电。（2）将生物质转化为气化气后再与煤混合燃烧。先将生物质气化，形成燃气，产生蒸气，带动蒸气轮机发电，即在小型燃煤电厂的基础上增加一套生物质气化设备，将生物质燃气直接通到锅炉中燃烧。生物质燃气的温度为 800℃ 左右，无须净化和冷却，在锅炉内完全燃烧所需时间短。这种混合燃烧方式通用性较好，对原燃煤系统影响较小。

混燃发电可提高生物质的燃烧效率和机组的发电效率。以秸秆为例，秸秆具有低碳、低氮特点，当与煤粉共燃时，可降低二氧化硫和氧化氮的排放，有利于保护生态环境。此外，秸秆与煤的混燃能促进煤的热解，使煤的热解温度向低温区移动，从而降低煤的着火温度；从工艺、设备角度而言，生物质秸秆与煤共燃技术简单易行，在现有燃煤电厂的基础上可稍加改造，无需大量投资，加上秸秆价格相对较低，可以大大节省燃料成本。

生物质混燃发电是在燃煤电厂基础上辅以生物质燃料进行发电的技术。一般来说，混燃发电具有建设周期短，投资少的特点。在掺烧率较低（20% 以下）的情况下，生物质燃料的转化效率相当高。另外，可以根据燃料的成本以及供求状况进行调整，这也从一定程度上保证了燃料供应的可靠性。



12.2.3 生物质气化发电

生物质气化发电是指固体生物质在气化炉中气化生成可燃气体，经过净化后驱动内燃机或小型燃气轮机发电。其基本原理是把生物质转化为可燃气体，再利用可燃气体推动燃气发电设备进行发电。它既能解决生物质难于燃用、分布分散的缺点，又可以充分发挥燃气发电技术设备紧凑而污染少的优点，所以是生物质能最有效最洁净的利用方法之一<sup>[4]</sup>。

12.2.3.1 生物质气化发电过程

生物质气化发电过程包括三个方面：

- (1) 生物质气化，把固体生物质转化为气体燃料；
- (2) 气体净化，气化出来的燃气都含有一定的杂质，包括灰分、焦炭和焦油等，需经过净化系统把杂质除去，以保证燃气发电设备的正常运行；
- (3) 燃气发电，利用燃气轮机或燃气内燃机进行发电，有的工艺为了提高发电效率，发电过程可以增加余热锅炉和蒸气轮机。

典型的生物质气化发电工艺如图 12-3 所示。其中，气化炉应对不同种类的生物质原料有较强的适应性。内燃机一般由柴油机或天然气机改造而成，以适应生物质燃气热值较低的要求；燃气轮机要求容量小，适于燃烧高杂质、低热值的生物质燃气。

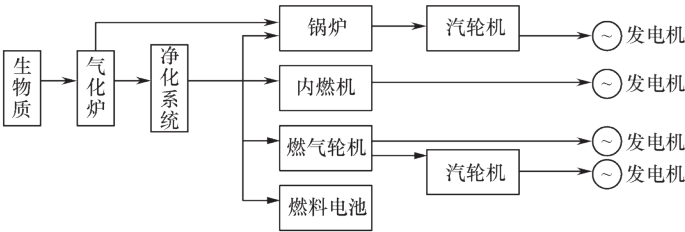


图 12-3 生物质气化发电工艺示意图

生物质气化发电技术是生物质能利用中有别于其他利用技术的一种独特方式，具有以下三个特点<sup>[8]</sup>。

- (1) 技术有充分的灵活性：生物质气化发电可用内燃机，也可用燃气轮机，甚至结合余热锅炉和蒸气发电系统，所以生物质气化发电可以根据规模的大小选用合适的发电设备，保证在任何规模下都有合理的发电效率。这一技术的灵活性能很好地满足生物质分散利用的特点。
- (2) 具有较好的洁净性：生物质本身属于可再生能源，较石化产品而言，可以有效地减少 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等有害气体的排放。而气化过程一般温度较低（约在 700℃～900℃），NO<sub>x</sub> 的生成量很少，所以能有效控制 NO<sub>x</sub> 的排放。
- (3) 经济性：生物质气化发电的灵活性，可以保证在小规模下有较好的经济性，同时，

燃气发电过程简单，设备紧凑，也使生物质气化发电技术比其他可再生能源发电技术投资更小。综上所述，生物质气化发电技术是所有可再生能源技术中最经济的发电技术。相对于其他可再生能源发电技术，其投资较小，综合发电成本低。

12.2.3.2 生物质气化类型

由于生物质气化发电系统采用气化技术和燃气发电技术有所不同，其系统构成和工艺过程存在很大的差别。从气化形式上看，生物质气化过程可以分为固定床气化和流化床气化两大类。

(1) 固定床气化：包括上吸式气化、下吸式气化和开心层式气化，这三种形式的气化发电系统现在都有代表性的产品。

(2) 流化床气化：包括鼓泡床气化、循环流化床气化及双流化床气化，其中研究和应用最多的是循环流化床气化发电系统。另外，为了实现更大规模的气化发电方式，提高气化发电效率，国内外正在积极开发高压流化床气化发电工艺。

固定床和流化床气化炉特性比较如表 12-1 所示。

表 12-1 固定床和流化床气化炉特性比较

	优点	缺点
固定 / 移动上吸式	简单，运行费用不高，产期温度约 250℃、可带压运行产气含尘少、碳转换效率高、热效率高	产气焦油产率高、可能产生搭桥、可能产生烧结、要求燃料尺寸小
固定 / 移动下吸式	简单焦油产率低	要求燃料尺寸小、对燃料灰分含量有限制、容量放大有限、可能搭桥和烧结
流化床	給料率和组分灵活、可适应高灰分燃料、可增压运行、产气 CH <sub>4</sub> 含量高、容积大、温度控制较容易	运行温度受燃料灰熔点限制、产气温度高、产气焦油、灰含量高、飞灰含量可能较高
循环流化床	运行灵活、运行温度可达 850℃	床内腐蚀和磨损、省区质气化控制难

12.2.3.3 生物质气化设备的选用

生物质气化发电系统由进料机构，燃气发生装置，燃气净化装置，燃气发电机组、控制装置及废水处理设备等部分组成，其中燃气发生装置和燃气发电装置是核心。

生物质的气化有各种各样的气化工艺过程。从理论上讲，任何一种气化工艺都可以构成生物质气化发电系统。但从气化发电的质量和经济性出发，生物质气化发电要求达到发电频率稳定、发电负荷连续可调两个基本要求，所以对气化设备而言，它必须达到燃气质量稳定，燃气产量可调，而且必须连续运行。在这些前提下，气化能量转换效率的高低是气化发电系统运行成本的关键所在<sup>[11]</sup>。

气化形式选定以后，从系统匹配的角度考虑，气化设备应满足以下要求：

(1) 产气尽可能干净，以减少后处理系统的复杂性，使焦油含量达到内燃机允许的程

度。如果后续净化系统选用催化裂解工艺，还要尽可能使原始气中的焦油具有易于催化裂解的特点；

- (2) 产气热值要高而且稳定，以提高内燃机的输出功率，增大整个系统的效率；
- (3) 设计气化炉本体及加料排渣系统，应充分考虑原料特性，实现连续运行；
- (4) 充分利用余热，提高能量利用率。

表 12-2 是各种气化炉的特性，是气化发电系统选择气化炉形式和控制运行参数的制约条件<sup>[12]</sup>。

表 12-2 几种气化形式对气化发电系统性能的影响

	上吸式	下吸式	鼓泡流化床	循环流化床
原料适应性	适应不同形状尺寸原料、含水量在 15 ~ 45% 间可稳定运行	大块原料不经预处理可直接使用	原料尺寸控制较严，需预处理过程	能适应不同种类的原料，但要求为细颗粒，原料需预处理过程
燃气特点	H <sub>2</sub> 和 C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> 含量少，CO <sub>2</sub> 含量高，焦油含量高，需要复杂净化处理	H <sub>2</sub> 含量增加，焦油经高温区裂解，含量减少	与直径相同的固定床比，产气量大 4 倍，焦油较少，燃气成分稳定，后处理过程简单	焦油含量少，产气量大，气体热值比固定床气化炉高 40% 左右，后处理简单
设备实用性、单炉生产能力、结构复杂程度、制造维修费用	生产强度小。结构简单、加工制造容易	生产强度小。结构简单，容易实现连续加料	生产强度是固定床的 4 倍，但受气流速度的限制。故障处理容易，维修费用低	生产强度是固定床的 8 ~ 10 倍，流化床的 2 倍，单位容积的生产能力最大，故障处理容易，维修费用低
与发电系统的匹配性	工作安全、稳定	安全、稳定	操作安全稳定，负荷调节幅度受气速的限制	负荷适应能力强，启动、停车容易，调节范围大，运行平稳

从实际应用上考虑，固定床气化炉较合适于小型、间隙性运行的气化发电系统，它的最大优点是原料不用预处理，而且设备结构简单紧凑，燃气中含灰量较低，净化可以采用简单的过滤方式，但它最大的缺点是固定床不便于放大，难以实现工业化，发电成本一般较高。另外，固定床由于加料和排灰问题，不便于设计为连续运行的方式，对气化发电系统的连续运行不利，而且燃气质量容易波动，发电质量不稳定，这些方面都限制了固定床气化技术在气化发电系统中的大量应用，是小型生物质气化发电系统实现产业化的最大技术难题。

流化床气化比较适合于气化发电工艺，首先流化床运行稳定，包括燃气质量，加料与排渣等非常稳定，而且流化床的运行连续可调，便于放大，适于生物质气化发电系统的工业应用。当然，流化床也有两个明显的缺点，一是原料需进行预处理，使原料满足流化床与加料的要求；二是流化床气化产生燃气中飞灰含量较高，不便于后续的燃气净化处理，这两方面都是目前生物质流化床工业应用正在研究解决的主要内容<sup>[12]</sup>。

生物质流化床气化有三种典型的形式，即鼓泡床气化，循环流化床气化及双床气化（见图 12-4 和图 12-5），三种流化床气化炉中以循环流化床气化速度最快。它适用于较小的生物质颗粒料，可以不必加流化床热载体，所以它运行最简单，但它的炭回流难以控制，在炭回流较少的情况下容易变成低速率的载流床。鼓泡床流化速度较慢，运行过程中需加热载体，较适用于颗粒较大的生物质原料。双床系统是鼓泡床和循环流化床的结合，它把燃烧和气化过程分开，燃烧床采用鼓泡床，气化床采用循环流化床，两床之间靠热载体进行传热，所以控制好热载体的循环速度和加热温度是双床系统最关键的技术。总的来说流化床气化由于存在飞灰和夹带炭颗粒严重，运行费用较大等问题，它不适合于小型气化发电系统，只适合于大中型气化发电系统<sup>[11,13]</sup>，所以研究小型的流化床气化技术在生物质能利用中很难有实际意义。

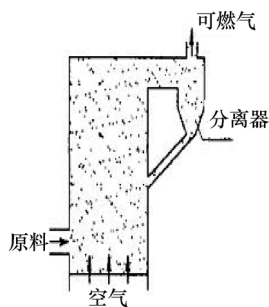


图 12-4 循环流化床气化炉结构示意图

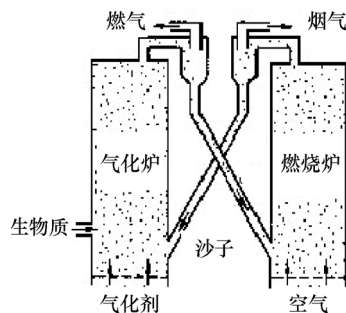


图 12-5 双流化床气化炉结构示意图

#### 12.2.3.4 燃气发电设备

从燃气发电设备上看，气化发电可分为内燃机发电系统，燃气轮机发电系统及燃气—蒸气联合循环发电系统<sup>[8]</sup>。

(1) 内燃机发电系统，以简单的内燃机组为主，可单独燃用低热值燃气，也可以燃气、燃油两用，它的特点是设备紧凑，系统简单、技术较成熟、可靠。

(2) 燃气轮机发电系统，采用低热值燃气轮机，燃气需增压，否则发电效率较低，由于燃气轮机对燃气质量要求较高，并且需有较高的自动化控制水平和燃气轮机改造技术，所以，一般单独采用燃气轮机的生物质气化发电系统较少。

(3) 燃气—蒸气联合循环发电系统，是在燃机、燃气轮机发电的基础上，增加余热蒸气的联合循环，这种系统可以有效地提高发电效率。一般来说，燃气—蒸气联合循环生物质气化发电系统，采用的是燃气轮机发电设备，而且最好的气化方式是高压气化，构成的系统称为生物质整体气化联合循环系统。

从发电规模来看，生物质气化发电系统可分为小型、中型、大型等几种类型，如表 12-3 所示<sup>[9]</sup>。

表 12-3 各种生物质气化发电技术的特点

规模	气化过程	发电过程	主要用途
小型系统 (功率小于 200kW)	固定床气化、流化床气化	内燃机 + 微型燃气轮机	农村用电、中小企业用电
中型系统 (功率 500~3000kW)	常压流化床气化	内燃机	大中企业自备电站、小型上网电站
大型系统 (功率大于 5000kW)	常压流化床气化、高压流化床气化、双流化床气化	内燃机 + 蒸气轮机燃气轮机 + 蒸气轮机	上网电站、独立能源系统

(1) 小型气化发电系统：简单灵活，其主要功能为农村照明或作为中小企业的自备发电机组，它所需的生物质数量较少，种类单一，可以根据不同生物质形状选用合适的气化设备，一般发电功率小于 200kW。

(2) 中型生物质气化发电系统：主要作为大中型企业的自备电站或小型上网电站，它适用于一种或多种不同的生物质，所需的生物质数量较多。生物质需要粉碎、烘干等预处理，所采用的气化方式主要以流化床气化为主体，中型生物质气化发电系统用途广泛，适用性强，是当前生物质气化发电技术的主要方式，功率一般为 0.5MW ~ 3MW。

(3) 大型生物质气化发电系统：主要作为上网电站，它适用的生物质较为广泛，所需的生物质数量巨大，必须配套专门的生物质供应中心和预处理中心，是今后生物质利用的主要方式。该系统功率一般在 5MW 以上，虽然与常规能源比仍显得非常小，但在技术发展成熟后，它将是今后替代常规能源电力的主要方式之一。

针对目前我国具体情况，采用气体内燃机代替燃气轮机，且其他部分基本相同的生物质气化发电系统，不失为解决我国生物质气化发电规模化发展的有效手段。一方面，采用气体内燃机可降低对燃气杂质的要求，可以大大减少技术难度；另一方面，避免了调控相当复杂的燃气轮机系统，大大降低系统的成本。这种技术方案适合于我国目前的工业水平，设备可以全部国产化，适合于发展分散的、独立的生物质能源利用体系，可以形成我国自己的产业，在发展中国家大范围处理生物质方面有更广阔的应用前景。小型气化发电采用简单的气化—内燃机发电工艺，发电效率一般在 14% ~ 20%，规模一般小于 3MW。中型气化发电除了采用气化—内燃机（或燃气轮机）发电工艺外，同时增加余热回收和发电系统，气化发电系统的总效率可达到 25% ~ 35%。另外，大规模的气化—燃气轮机联合循环发电系统作为先进的生物质气化发电技术，能耗比常规系统低，总体效率高于 40%，但关键技术仍未成熟，尚处在示范和研究阶段<sup>[10]</sup>。

1. 燃气内燃机发电

燃气内燃机功率比较小，主要用在小型的分布式电站。生物质燃气的特点是热值低、杂质含量高，所以生物质燃气发电技术虽然与煤气发电技术、天然气发电技术的原理一样，由于原料的不同，对发电设备的要求也与其他燃气发电设备有较大的差别。生物质燃气内燃机必须解决以下问题<sup>[4]</sup>：



(1) 生物质气化气热值低, 导致内燃机出力大幅降低, 为了维持相同的出力, 需要对内燃机进料系统、燃烧系统以及压缩比等做较大改动。一般生物质气化气热值仅为天然气热值的  $1/5 \sim 1/6$ , 相同规格的燃气机在燃用生物质气化气时出力将降低  $1/3$  左右 (相对于柴油将降低  $50\%$  左右), 如果是增压的燃气内燃机, 出力降低将更大, 各系统的改动将更加复杂。

(2) 生物质气化气中  $H_2$  量高容易引发的爆燃问题。由于  $H_2$  的着火速度较其他燃气快, 当生物质气化气中  $H_2$  含量过高时, 燃气内燃机内容易出现点火时间不规律, 从而引起爆燃。而且, 不同原料、不同处理方式制备的生物质燃气中氢气含量差别很大, 流化床一般在  $10\%$  左右, 而固定床有时将高于  $15\%$ 。大量试验表明, 当生物质燃气中  $H_2$  含量高于  $18\%$  时, 爆燃的问题将较严重, 为安全生产, 一般生物质燃气内燃机要求燃气中  $H_2$  含量低于  $15\%$ 。

(3) 焦油及含灰量的影响。虽然生物质燃气经过了严格的净化, 但仍有一定的焦油和灰。焦油会引起点火系统失灵, 燃烧后积炭会增加磨损, 而含灰量太高也会增加设备磨损, 严重时会引起拉缸。所以一般生物质燃气内燃机机组的配件损耗和润滑油消耗为其他燃气内燃机数倍。

(4) 排烟温度过高及效率过低问题。由于低热值燃气燃烧速度比其他燃料慢, 低热值燃气内燃机的排烟温度比其他内燃机明显偏高。这就使设备材料容易老化而系统效率有明显降低。

由于上述难题, 我国生物质燃气发电机组的产品开发很少, 目前只有  $200kW$  的机组, 更大的机组还没有定型产品, 正在开发之中。国外这方面的产品也很少, 只有低热值与双燃料机组, 大型的机组和单燃料生物质燃气机都是从天然气机组改装而来, 所以产品价格很高, 是柴油机组价格的  $1 \sim 2$  倍。GE 颜巴赫燃气内燃机在以可燃气为燃料的活塞往复式内燃机、成套发电机组和热电联供系统领域处于全球领先地位 (见图 12-6)。GE 颜巴赫内燃机可以提供从  $0.25$  至  $9.5$  兆瓦发电功率范围的燃气内燃机。它们既能使用天然气, 又能使用多种可燃气 (如生物沼气、垃圾填埋气、煤层气、污水沼气、可燃工业废气等)。当前, 经济可靠的单燃料生物质燃气内燃机组的开发研究, 是发展中小型生物质气化发电系统的主要内容之一。

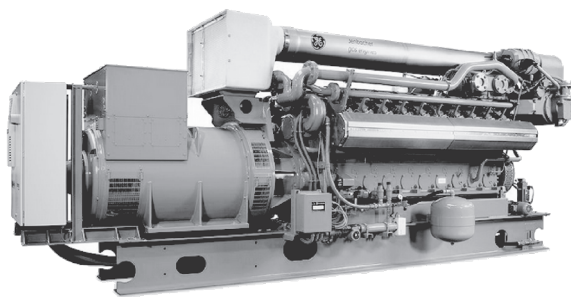


图 12-6 GE 颜巴赫燃气内燃机

## 2. 燃气轮机发电

燃气轮机功率比较大，主要用在大、中型电站。燃气轮机是以连续流动的气体为工质带动叶轮高速旋转，将燃料的能量转变为有用功的内燃式动力机械，是一种旋转叶轮式热力发动机，是最常见的发电设备之一。燃气轮机的绝热压缩、等压加热、绝热膨胀和等压放热等四个过程分别在压气室、燃烧室、燃气涡轮和回热器或大气中完成（见图 12-7）。大型燃气轮机的压气机为多级轴流式，中小型的为离心式，燃气涡轮带动压气和发电机。作为发电用途的燃气技术，一般规模在几 MW 以上，小于 3MW 的燃气发电设备应用较少，而最大的已达几百 MW。

生物质气化发电对燃气轮机有特殊要求。生物质气化气为低热值燃气，它的燃烧温度、发电效率偏低，同时由于生物质气化气体积大，压缩困难，从而进一步降低了系统发电效率；其次，生物质气化气中杂质偏高，特别是其中含有碱金属等腐蚀成份，因此生物质气化发电对燃气轮机的转速和材料提出了更苛刻的要求<sup>[14,15]</sup>。在实际应用方面，由于生物质较分散，建设的生物质气化发电规模有限，所配套的燃气轮机也较小，小型燃气轮机单位造价较高，且设备的效率较低，这几方面推高了燃气轮机应用于生物质气化发电系统的成本。

研究发现<sup>[8]</sup>，生物质气化气中较高的碱金属和硫化物会对轮机造成损伤，一般在生物质中硫的含量很少，但即使很少量的硫，例如含硫量约 0.1% 时，燃气中的硫化物也可能高达 100ppm，这对燃气轮机设备的影响是明显的。

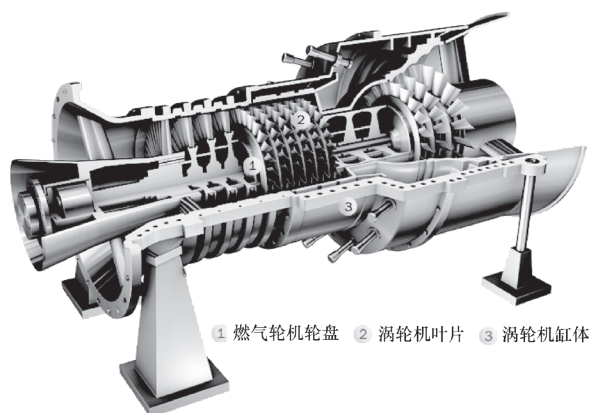


图 12-7 燃气轮机剖面图

从表 12-4 可以看出，燃气轮机对杂质的要求极为苛刻，针对不同的生物质原料，燃气轮机也必须经过相应改造，以适应生物质气化发电系统的特殊要求。目前，国内外仍没有适用于所有生物质气化发电系统的通用技术和设备，而示范工程都是由研究部门或厂家依据项目的要求进行专门改造和订造的，造价非常高，所以燃气轮机技术是制约生物质气化发电技术大型化发展的关键因素之一。

表 12-4 燃气轮机对燃气的要求

燃气成分及杂质		燃气轮机可接受的范围
最低气体低热值		>4 ~ 6MJ/NM <sup>3</sup>
最低气体中氢含量		>10 ~ 20%
碱金属最高含量		<20 ~ 1000ppb
最高燃气温度		<450 ~ 600℃
焦油		在进口温度下必须为全相
最大的颗粒浓度 (灰、碳)等	>10 μ	<0.1ppm
	10 ~ 20 μ	<0.1ppm
	4 ~ 10 μ	<10ppm
NH <sub>3</sub>		没限制
HCL		0.5ppm
SiH 或 SO <sub>2</sub>		1ppm
N <sub>2</sub>		没限制
总的金属		<1ppm
碱金属 + 硫		<0.1ppm

3. 燃气 - 蒸气循环联合发电技术

燃气—蒸气联合循环发电系统是在内燃机、燃气轮机发电的基础上增加余热蒸气的联合循环，该种系统可以有效地提高发电效率。它的一般系统效率可以达 40% 以上，是目前发达国家重点研究的内容。

不管是燃气轮机，还是燃气内燃机，发电后排放的尾气温度高达 500℃ ~ 600℃，如果发电设备带空气增压系统，尾气温度也能达到 450℃ ~ 500℃ 之间，从能量利用的角度而言，高温尾气含有大量可回收的能量。在燃气发电设备后增加余热锅炉等余热回收装置，可有效提高发电系统效率。生物质气化发电系统中，除发电设备尾气蕴藏大量余热外，生物质气化炉出口的燃气达 700℃ ~ 800℃ 左右，将这部分气化显热和燃气发电设备的余热结合起来，利用余热锅炉和过热器产生蒸气，再利用蒸气循环进行发电，可实现能量的高效利用。

目前，大部分生物质的联合循环发电项目的效率都在 35% 以上，比一般简单的生物质气化—内燃机发电系统高出了近 1 倍。

总体而言，生物质气化发电有三种基本的形式，一是采用内燃机，二是采用燃气轮机，三是采用蒸气联合循环发电系统（见图 12-8）。燃气内燃机与燃气轮机的选用主要是依据气化发电系统规模来确定的，虽然两者之间有明显的界限，一般认为 5 ~ 10MW 以下选用燃气内燃机气化发电系统，10MW ~ 20MW 选用常压燃气轮机气化发电系统，但超过 20MW 的气化发电系统除了必须采用燃气轮机外，还必须采用高压气化技术。在小规模下，由于燃气内燃机具有效率高、体积小、易维护的优点，特别是它对燃气的质量要求技术低，允

许杂质的含量较高，所以它的用途更广泛。而在大规模发电下，燃气轮机具有更明显的优势，采用燃气轮机的气化发电系统通常带有蒸气联合循环，效率能明显提高<sup>[16,17]</sup>。

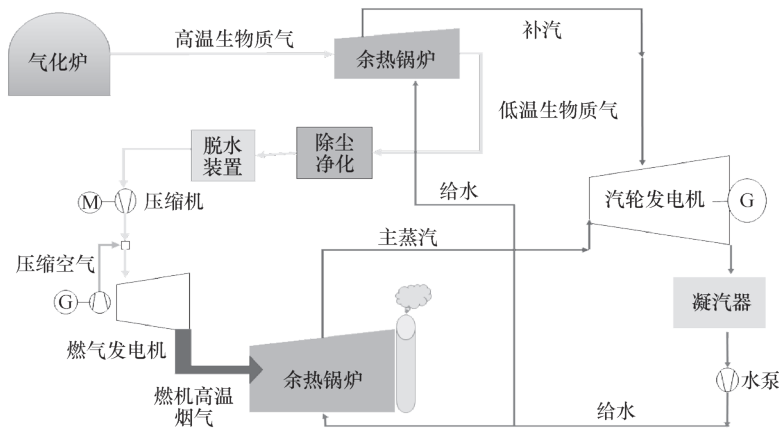


图 12-8 联合循环发电系统

### 12.3 生物质发电面临的挑战和机遇

总体而言，我国生物质发电产业尚处于起步阶段，产业化和商业化程度较低，效益并不乐观，市场竞争较弱，主要表现在以下方面：

（1）建设和运营成本相对较高。上网电价难以支撑生物质能发电厂的正常运营。据测算，在现有的技术水平下，生物质发电成本约为煤电的 1.5 倍，主要体现在启动资金高、机组热效率低于常规火电机组、燃料运输保存成本较高等方面。

（2）技术开发能力和产业体系较薄弱。目前，我国生物质发电设备主要依靠进口，国内缺乏核心技术和设备的研发能力，这也是造成电厂建设和运营成本相对较高的重要原因之一。例如，国际上生物质直燃发电技术也发展到较高水平，我国在设计、制造和运营用于直燃发电的与处理设备和锅炉等方面还欠缺一定的技术和经验。可喜的是，近年国内涌现出以凯迪电力为代表的领军企业，正逐步打破国外垄断，并在部分领域已经达到了世界领先水平。目前凯迪电力主打的是“二代”锅炉设备，向电网每供 1kwh 电能，只需消耗生物质燃料 1.23kg，能源转化效率提升至 33.49%，而国际上生物质发电设备能源转化效率最高约为 28%。阳光凯迪公司正在开发的“第三代”亚临界技术生物质锅炉及“第四代”BIGCC 技术生物质锅炉均已具备商业化生产条件，能源转化率有望提升至 45%，较“第二代”锅炉燃烧效率提升 34%，达到全球最高水平。

（3）生物质秸秆燃料组织较困难。根据中国国情，农业以散户种植形式为主，未能形成西方国家的大农场结构，这就给生物质发电的燃料收集、供给及预测成本等带来了极大

困难,并由此引发了生物质发电在国家政策、融(投)资、建设、上网、经济性及运行模式等方面一系列的问题,主要包括:①收购难。农民出售秸秆的意识不强,尤其是经济较发达的地区,因秸秆收购价格较低,达不到农民的期望价格,影响农民出售秸秆积极性。②储存难。由于秸秆收购具有较强的季节性,秸秆不能连续提供,而生物质发电企业一般至少需储存半年的秸秆量。同时,农作物秸秆密度较小,堆放存储场地要求较大,还需进行防潮、防雨、防火和防雷设施建设,需占用土地较多,投资建设费和维护费用较大。

综上所述,我国生物质发电产业化还需要在以下方面完善:

(1) 完善政府宏观调控政策,加大对生物质发电产业的支持力度。由于我国生物质发电厂建设成本和运营成本较高,在某些地区,生物质发电所适用的电价仍不能实现盈利,需要加大对生物质发电的相关补贴。我国生物质发电要尽快实现产业化,离不开政府的政策支持和资金支持。借鉴国外的生物质发电是在政策激励和扶持下逐渐发展起来,并形成了目前蓬勃发展的生物质发电产业。鼓励生物质发电发展的政策主要体现在价格激励、减免税费、财政补贴等方面。

(2) 提高研发能力。生物质发电产业化发展离不开关键技术和核心装备的研发和改进。引导科研院所、科研高校和具备相关技术开发能力的电厂,鼓励跨地区科研项目合作,积极开展对外交流合作,不断推进我国生物质发电技术开发和装备研究水平。

## 参考文献

- [1] 王振江.我国生物质能直燃发电项目发展的关键问题[C].2006年节能与可再生能源发电技术研讨会论文集.2006:264-268.
- [2] 朱德辉.天门再生能源环保热电厂工程可行性研究[D].上海:同济大学,2005.
- [3] 肖雪.含风电场及电动汽车的电力系统规划优选协调研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [4] 黄剑光.浅谈生物质气化在发电技术应用[J].应用能源技术,2009,(4):25-29.
- [5] 樊篱.农业废弃物直燃发电项目的风险研究[D].华北电力大学(北京),2010.
- [6] 别如山,王庆功,修太春等.生物质燃烧发电过程中若干问题的探讨[J].工业锅炉,2009,(6):6-10.
- [7] 李廉明,余春江,柏继松等.中国秸秆直燃发电技术现状[J].化工进展,2010,29(z1):84-90.
- [8] 吴创之.生物质气化发电技术(1)气化发电的工作原理及工艺流程[J].可再生能源,2003,(1):41-43.
- [9] 兰维娟.生物质气化与燃气轮机燃烧集成发电实验与模拟研究[D].天津大学,2013.
- [10] 阴秀丽,周肇秋,马隆龙等.生物质气化发电技术现状分析[J].现代电力,2007,24(5):48-52.
- [11] 吴创之.生物质气化发电技术讲座(2)生物质气化工艺的设计与选用[J].可再生能源,2003,(2):51-52.
- [12] 马洪儒,崔亚量.生物质气化发电技术相关问题的研究[J].农机化研究,2007,(6):190-193.
- [13] 吴



- 创之. 生物质气化发电技术讲座 (5) 生物质燃气发电技术 [J]. 可再生能源, 2003, (5): 58-60.
- [13] 池里杰. 生物质燃气分布式供能系统的控制研究 [D]. 上海交通大学, 2008.
- [14] 杜云川. 秸秆类生物质两段式气化实验研究 [D]. 上海交通大学, 2009.
- [15] 盛建菊. 生物质气化发电技术的进展 [J]. 节能技术, 2007, 25(1): 67-70.
- [16] 刘宝亮, 蒋剑春. 生物质能源转化技术与应用 ( VI )——生物质发电技术和设备 [J]. 生物质化学工程, 2008, 42(2): 55-60.

## 附录——生物质能相关政策

### 一、成型燃料相关政策

1. 《国务院办公厅关于加快推进农作物秸秆综合利用的意见》（国办发〔2008〕105号）
2. 《财政部关于印发〈可再生能源发展专项资金管理暂行办法〉的通知》（财建〔2006〕237号）
3. 《秸秆能源化利用补助资金管理暂行办法》
4. 《关于资源综合利用及其他产品增值税政策的通知》（财税〔2008〕156号）
5. 《关于调整完善资源综合利用产品及劳务增值税政策的通知》（财税〔2011〕115号）
6. 《秸秆能源化利用补助资金管理暂行办法》财政部（财建〔2008〕735号）

### 二、生物质发电相关政策

1. 国务院关于进一步加大工作力度确保实现“十一五”节能减排目标的通知（国发〔2010〕12号）
2. 《关于“十二五”期间环保产业发电的意见》明确提出“推广生活垃圾焚烧发电技术”
3. 《关于环保系统进一步推动环保产业发展的指导意见》大型城市垃圾焚烧处理纳入“十二五”期间，环保产业发展的重点。
4. 科技部、环保部、中国科学院等7部门联合发布的《废物资源化科技工程“十二五”专项规划》
5. 国家发展改革委关于印发《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》的通知（发改价格〔2006〕7号）
6. 可再生能源电价附加收入调配暂行办法（发改价格〔2007〕44号）
7. 关于进一步加强生物质发电项目环境影响评价管理工作的通知（环境保护部、国家发展和改革委员会、国家能源局，环发〔2008〕82号）
8. 国家发展改革委关于生物质发电项目建设管理的通知（发改能源〔2010〕1803号）
9. 关于完善农林生物质发电价格政策的通知（国家发改委，发改价格〔2010〕1579号）
10. 国家发展改革委关于完善垃圾焚烧发电价格政策的通知（发改价格〔2012〕801号）

### 三、沼气工程相关政策

1. 《可再生能源中长期发展规划》，确定了可再生能源开发利用的中长期总量目标。

2. 农业部于 2007 年 3 月发布了《全国农村沼气工程建设规划（2006—2010 年）》
3. 《农村沼气项目建设资金管理办法》（财政部、农业部，财建[2007]434 号）
4. 《中共中央国务院关于做好农业和农村工作的意见》（中发[2003]3 号）
5. 《中共中央国务院关于促进农民增收若干政策的意见》（中发[2004]1 号）
6. 《中共中央国务院关于进一步加强农村工作提高农业综合生产能力若干政策意见》（中发[2005]1 号）
7. 《国务院关于做好建设节约型社会近期重点工作的通知》（国发[2005]21 号）文件要求“在农村大力发展户用沼气池和大中型畜禽养殖场沼气工程，推广省柴节煤灶”。
8. 《中共中央国务院关于推进社会主义新农村建设的若干意见》（中发[2006]1 号）
- 《关于积极发展现代农业扎实推进社会主义新农村建设的若干意见》（中发[2007]1 号）
9. 《农业部 国家发展和改革委员会关于进一步加强农村沼气建设管理的意见》

#### 四、生物液体燃料相关政策

1. 可再生能源发展专项资金管理暂行办法（财建[2007]371 号）
2. 财政部关于印发《生物能源和生物化工非粮引导奖励资金管理暂行办法》的通知（财建[2007]282 号）
3. 中华人民共和国国家标准一车用乙醇汽油（GB18351-2004）
4. 关于印发《车用乙醇汽油使用试点方案》和《车用乙醇汽油使用试点工作实施细则》的通知（国家经贸委、国家计委、财政部、国家税务总局、公安部、国家工商行政管理总局、国家质监总局，国经贸技术[2002]174 号）
5. 关于印发《车用乙醇汽油扩大试点方案》和《车用乙醇汽油扩大试点工作实施细则》的通知（国家发改委、公安部、财政部、商务部、国家计委、国家税务总局、国家环境保护总局、国家工商行政管理总局、国家质监总局，发改工业[2004]230 号）
6. 关于加强生物燃料乙醇项目建设管理，促进产业健康发展的通知（国家发改委、财政部，发改工业[2006]2842 号）
7. 《含 5% 生物柴油的柴油机调和燃料（B5）地方标准》

#### 五、财税优惠政策

1. 关于发展生物能源和生物化工财税扶持政策的实施意见（财政部、国家发改委、农业部、税务总局、林业局，财建[2006]702 号）
2. 财政部关于印发《生物能源和生物化工原料基地补助资金管理暂行办法》的通知（财建[2007]435 号）
3. 关于印发《秸秆能源化利用补助资金管理暂行办法》的通知（财建[2008]735 号）
4. 财政部、国家税务总局关于资源综合利用及其他产品增值税政策的通知（财税

[2008]156号)

5. 关于以农林剩余物为原料的综合利用产品增值税政策的通知 (财税 [2009]148 号)

6. 关于以蔗渣为原料生产综合利用产品增值税政策的补充通知 (财税 [2010]114 号)

7. 关于印发《可再生能源发展基金征收使用管理暂行办法》的通知 (财综 [2011]115 号)

8. 中央环境保护专项资金项目申报指南 (2006~2010 年)